

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

MARIA CLARA RESENDE PONCE

DESSECAÇÃO PRÉ-COLHEITA DO FEIJOEIRO: TAXA DE APLICAÇÃO,
ADJUVANTES E MONITORAMENTO POR RPA

UBERLÂNDIA

2026

MARIA CLARA RESENDE PONCE

DESSECAÇÃO PRÉ-COLHEITA DO FEIJOEIRO: TAXA DE APLICAÇÃO,
ADJUVANTES E MONITORAMENTO POR RPA

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título doutora em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Cleyton Batista de Alvarenga

UBERLÂNDIA

2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

P792 Ponce, Maria Clara Resende, 1995-
2026 Dessecação pré-colheita do feijoeiro: taxa de aplicação,
adjuvantes e monitoramento por RPA [recurso eletrônico] / Maria
Clara Resende Ponce. - 2026.

Orientador: Cleyton Batista de Alvarenga.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-
graduação em Agronomia.

Modo de acesso: Internet.

DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2026.639>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Agronomia. I. Alvarenga, Cleyton Batista de ,1981-, (Orient.).
II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em
Agronomia. III. Título.

CDU: 631

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Secretaria da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em
Agronomia

Rodovia BR 050, Km 78, Bloco 1CCG, Sala 206 - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 2512-6715/6716 - www.ppgagro.iciag.ufu.br - posagro@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Tese, 011/2026, PPGAGRO				
Data:	Vinte e seis de maio de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	12:00
Matrícula do Discente:	12213AGR013				
Nome do Discente:	Maria Clara Resende Ponce				
Título do Trabalho:	Dessecação pré-colheita do feijoeiro: taxa de aplicação, adjuvantes e monitoramento por RPA				
Área de concentração:	Produção Vegetal				
Linha de pesquisa:	Produção Vegetal em Áreas de Cerrado				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Mariana Rodrigues Bueno - UFU; Frederico Cássio Moreira Martins - IF Sudeste - MG, Charles Cardoso Santana - EPAMIG ITAP, Robson Shigueaki Sasaki - IFMG; Cleyton Batista de Alvarenga - UFU orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Cleyton Batista de Alvarenga, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

Aprovada.

Essa tese possui mérito para ser indicada como destaque do Programa? () SIM
NÃO (x)

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos,

conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Cleyton Batista de Alvarenga, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/05/2026, às 12:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mariana Rodrigues Bueno, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/05/2026, às 12:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Charles Cardoso Santana, Usuário Externo**, em 26/05/2026, às 15:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Frederico Cássio Moreira Martins, Usuário Externo**, em 26/05/2026, às 18:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Robson Shigueaki Sasaki, Usuário Externo**, em 26/05/2026, às 19:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7343145** e o código CRC **F62A53A8**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por tudo o que me permitiu alcançar, e por me conceder a graça de concluir mais esta etapa da minha trajetória, por intercessão de Nossa Senhora Aparecida, a quem sou devota.

Aos meus pais, Suzeli e Isac, expresso minha gratidão pelo apoio incondicional ao longo de toda a minha formação — pela dedicação, amor, paciência e sabedoria que me guiaram. Ao meu irmão Guilherme, agradeço a parceria, carinho e compreensão. A minha amada avó Isabel, que nos deixou um legado de muita luta e resignação. Registro ainda minha profunda gratidão a Rosália, cujos conselhos e lembrança permanecem vivos em meu coração.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cleyton Batista de Alvarenga, sou grata pela orientação, confiança e pelos ensinamentos compartilhados durante este percurso.

Agradeço à Algar Farming e aos colaboradores da fazenda Gaia que colaboraram diretamente na instalação dos ensaios de campo.

Às amigas Sloane, Mariana, Monara, Luana e Gislaine, obrigada pelo apoio, companheirismo e, sobretudo, pela amizade que cultivamos.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), pela oportunidade de realizar o doutorado, e a todos os professores, técnicos e funcionários do Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG), pelo suporte prestado.

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), processo APQ-00434-24, pelo suporte à realização desta pesquisa.

Aos membros da banca examinadora, obrigada pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições para o aperfeiçoamento deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste projeto, deixo meu sincero e profundo agradecimento.

RESUMO

A dessecação pré-colheita do feijoeiro é uma prática estratégica para agilizar a colheita, mas sua eficácia depende da otimização da tecnologia de aplicação e de métodos de monitoramento precisos. Este estudo objetivou avaliar o impacto de diferentes taxas de aplicação e da adição de adjuvantes na eficácia da dessecação pré-colheita no feijoeiro, integrando análise cienciométrica, ensaios de campo e caracterização físico-química em laboratório. Inicialmente, realizou-se um mapeamento bibliométrico global nas bases Scopus e Web of Science para avaliar a evolução do uso de aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) e do índice NDVI na agricultura. Em campo, avaliou-se durante duas safras o efeito de três taxas de aplicação (50, 100 e 150 L ha⁻¹) e da adição de um adjuvante organosiliconado sobre a deposição de calda, desfolha e umidade dos grãos. Simultaneamente, validou-se a acurácia de índices NDVI obtidos por sensores multiespectral e RGB no monitoramento da senescência. Em laboratório, determinou-se o espectro de gotas, a tensão superficial e a viscosidade das caldas em delineamento inteiramente casualizado (fatorial 3 x 4), combinando as três taxas com quatro composições de calda (sem adjuvante, polidimetilsiloxano, D'limoneno e nonilfenol etoxilado). A análise cienciométrica evidenciou o crescimento exponencial das publicações relacionadas a ARPs e NDVI, consolidando-os como pilares tecnológicos do monitoramento agrícola moderno. Em campo, a taxa de 100 L ha⁻¹ promoveu deposição e eficácia semelhantes a 150 L ha⁻¹ e superiores a 50 L ha⁻¹. O adjuvante organosiliconado não alterou a deposição física da calda, mas acelerou significativamente a perda de umidade dos grãos, sugerindo otimização na absorção. No monitoramento, a correlação do sensor RGB degradou-se após a aplicação, rejeitando a hipótese de que este possa substituir o multiespectral com a mesma acurácia. Em laboratório, o adjuvante polidimetilsiloxano proporcionou a maior redução da tensão superficial e o maior aumento no diâmetro mediano volumétrico (DMV), resultando na menor porcentagem de gotas suscetíveis à deriva (%<100 µm). Conclui-se que a taxa de 100 L ha⁻¹ representa o melhor equilíbrio técnico e operacional. Sua associação ao adjuvante organosiliconado potencializa a eficácia da dessecação. Ademais, o uso de pontas com indução de ar sobrepõe-se ao efeito físico-químico dos adjuvantes na atomização primária, garantindo a segurança da aplicação, processo que deve ser preferencialmente monitorado por sensores multiespectrais embarcados em ARPs.

Palavras-chave: adjuvantes; NDVI; *Phaseolus vulgaris* L.; taxa de aplicação; VANTs.

ABSTRACT

Pre-harvest desiccation of common beans is a strategic practice, but its effectiveness depends on optimizing application technology and precise monitoring methods. This study aimed to evaluate the impact of different application rates and the addition of adjuvants on desiccation efficacy, integrating scientometric analysis, field trials, and physicochemical characterization in the laboratory. Initially, a global bibliometric mapping was performed in the Scopus and Web of Science databases to assess the evolution of the use of remotely piloted aircraft (RPAs) and the NDVI index in agriculture. In the field, the effect of three application rates (50, 100, and 150 L ha⁻¹) and the addition of an organosilicone adjuvant on spray deposition, defoliation, and grain moisture was evaluated over two growing seasons. Simultaneously, the accuracy of NDVI indices obtained by multispectral and RGB sensors in monitoring senescence was validated. In the laboratory, the droplet spectrum, surface tension, and viscosity of the spray solutions were determined in a completely randomized design (3 x 4 factorial), combining the three application rates with four spray solution compositions (without adjuvant, polydimethylsiloxane, D'limonene, and nonylphenol ethoxylate). Scientometric analysis showed the exponential growth of publications on ARPs and NDVI, consolidating them as technological pillars of modern agricultural monitoring. In the field, the 100 L ha⁻¹ application rate promoted deposition and efficacy similar to 150 L ha⁻¹ and superior to 50 L ha⁻¹. The organosilicone adjuvant did not alter the physical deposition of the spray solution, but significantly accelerated moisture loss from the grains, suggesting optimization in absorption. In monitoring, the correlation of the RGB sensor degraded after application, rejecting the hypothesis that it can replace the multispectral sensor with the same accuracy. In the laboratory, polydimethylsiloxane provided the greatest reduction in surface tension and the greatest increase in volume median diameter (VMD), resulting in the lowest percentage of droplets susceptible to drift (%<100 µm). It is concluded that a rate of 100 L ha⁻¹ represents the best technical and operational balance. Its association with the organosilicone adjuvant enhances the effectiveness of desiccation. Furthermore, the use of air-induction nozzles overrides the physicochemical effect of adjuvants in primary atomization, ensuring application safety, a process that should preferably be monitored by multispectral sensors mounted on UAVs.

Keywords: adjuvants; NDVI; *Phaseolus vulgaris* L.; application rate; UAVs.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 2

Figura 1 - Identificação de artigos por meio de bases de dados (Scopus e WoS).	27
Figura 2 - Evolução do número de publicações na base Scopus sobre pesquisas científicas com o índice NDVI obtido por ARPs.....	29
Figura 3 - Evolução do número de publicações na base WoS sobre pesquisas científicas com o índice NDVI obtido por ARPs.....	30
Figura 4 - Rede de autores conectados por coautoria, com pelo menos 3 documentos publicados ao longo do período (2010 – 2025), base Scopus.	32
Figura 5 - Rede de autores conectados por coautoria, com pelo menos 3 documentos publicados ao longo do período (2000 – 2025), base WoS.....	32
Figura 6 - Rede de autores conectados por coautoria, a partir da busca isolada na base Scopus por trabalhos com a utilização do índice NDVI obtido por ARPs correlacionados à maturidade fisiológica das plantas (A) e à eficácia de aplicação de defensivos agrícolas (B) publicados ao longo do período (2010 – 2025)	33
Figura 7 - Rede de ocorrência de palavras-chave dos documentos obtidos pela base de dados Scopus, com número mínimo de ocorrências limitado a 3, com 160 resultados.	37
Figura 8 - Rede de ocorrência de palavras-chave dos documentos obtidos pela base de dados Web of Science, com número mínimo de ocorrências limitado a 3, com 550 resultados.	37

CAPÍTULO 3

Figura 1 - Campos experimentais, cultivar TAA DAMA, ensaio I (A) e ensaio II (B).....	48
---	----

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Lista dos dez autores com o maior número de citações dentre os artigos encontrados na base Scopus.	34
Tabela 2 - Lista dos dez autores com o maior número de citações dentre os artigos encontrados na base WoS.....	35

CAPÍTULO 3

Tabela 1 - Parâmetros operacionais utilizados para a aplicação das diferentes taxas de aplicação.	50
Tabela 2 - Condições meteorológicas durante a aplicação dos tratamentos nos dois ensaios.	50
Tabela 3 - Deposição de calda no terço médio do feijoeiro submetido a diferentes taxas de aplicação e adição de adjuvante organosiliconado no Ensaio I (2ª safra) e Ensaio II (3ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.	55
Tabela 4 - Teor de umidade dos grãos de feijoeiro submetido a diferentes taxas de aplicação e adição de adjuvante organosiliconado no Ensaio I (2ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.	57
Tabela 5 - Teor de umidade dos grãos de feijoeiro submetido a diferentes taxas de aplicação e adição de adjuvante organosiliconado no Ensaio II (3ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.	58
Tabela 6 - Percentual de desfolha do feijoeiro submetido a diferentes taxas de aplicação e adição de adjuvante organosiliconado no Ensaio I (2ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.	60
Tabela 7 - Percentual de desfolha do feijoeiro submetido a diferentes taxas de aplicação e adição de adjuvante organosiliconado no Ensaio II (3ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.	61
Tabela 8 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), estimado por sensor RGB, em dossel de feijoeiro submetido a diferentes taxas de aplicação e adição de adjuvante no Ensaio I (2ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.	63
Tabela 9 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), estimado por sensor RGB, em dossel de feijoeiro submetido a diferentes taxas de aplicação e adição de adjuvante no Ensaio II (3ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.	64
Tabela 10 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), obtido por sensor multiespectral, em dossel de feijoeiro submetido a diferentes taxas de aplicação e adição de adjuvante no Ensaio II (3ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.	65
Tabela 11 - Coeficientes de correlação de Pearson entre umidade dos grãos, percentual de desfolha e NDVI (estimado por sensor RGB) no Ensaio I (2ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.	67

Tabela 12 - Coeficientes de correlação de Pearson entre umidade dos grãos, percentual de desfolha e NDVI (obtidos por sensores RGB e multiespectral) no Ensaio II (3ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.	68
--	----

CAPÍTULO 4

Tabela 1 - Especificações técnicas, funções e concentrações dos adjuvantes utilizados no preparo das caldas.	82
Tabela 2 - Tensão superficial das caldas herbicidas sob diferentes taxas de aplicação e adjuvantes. Monte Carmelo - Minas Gerais.	85
Tabela 3 - Viscosidade dinâmica das caldas herbicidas sob diferentes taxas de aplicação e adjuvantes. Monte Carmelo - Minas Gerais.	86
Tabela 4 - Parâmetros do espectro de gotas gerados por ponta com indução de ar sob diferentes taxas de aplicação e adjuvantes. Monte Carmelo - Minas Gerais.	88

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	15
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	15
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
REFERÊNCIAS.....	18
CAPÍTULO 2	21
RESUMO	22
ABSTRACT.....	23
1 INTRODUÇÃO.....	24
2 METODOLOGIA.....	25
2.1 Fonte de dados	25
2.2 Seleção dos estudos e extração de dados	26
2.3 Análise de dados e visualização	27
2.4 Delimitação do estudo e limitações reconhecidas.....	28
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
3.1 Contribuições e co-autoria	30
3.2 Rede de citações.....	33
3.3 Rede de conexão entre palavras – chave.....	36
4 CONCLUSÃO.....	38
REFERÊNCIAS.....	40
CAPÍTULO 3	43
RESUMO.....	44
1 INTRODUÇÃO.....	46
2 MATERIAL E MÉTODOS	48

2.1 Área de estudo	48
2.2 Delineamento experimental e equipamentos	49
2.3 Produtos e aplicação dos tratamentos	49
2.4 Condições meteorológicas	50
2.5 Avaliações.....	50
2.5.1 Deposição foliar.....	51
2.5.2 Eficácia agronômica.....	51
2.5.3 Obtenção dos índices NDVI	52
2.5.3.1 Aquisição e processamento de imagens.....	52
2.6 Análises Estatísticas.....	54
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
3.1 Deposição da calda: efeito da taxa de aplicação e do adjuvante.....	55
3.2 Eficácia agronômica da dessecação pré-colheita do feijoeiro	56
3.3 Monitoramento da dessecação por sensoriamento remoto	62
3.4 Análise de correlação e validação quantitativa das hipóteses.....	67
3.4.1 O NDVI e a dissociação de efeitos	67
3.4.2 A dinâmica para o método de estimação do NIR	68
4 CONCLUSÃO.....	69
REFERÊNCIAS.....	71
CAPÍTULO 4.....	78
1 INTRODUÇÃO.....	81
2 MATERIAL E MÉTODOS	83
2.1 Delineamento experimental e tratamentos.....	83
2.2 Composição das caldas	83
2.3 Avaliações.....	84
2.3.1 Tensão superficial e viscosidade da calda	84
2.3.2 Avaliação do espectro de gotas.....	84

2.4 Análises Estatísticas.....	85
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	86
3.1 Tensão superficial e viscosidade da calda	86
3.2 Espectro de gotas	88
4 CONCLUSÃO.....	92
REFERÊNCIAS.....	93

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

A evolução das práticas agrícolas, impulsionada por novas tecnologias voltadas à otimização dos resultados no campo, tem proporcionado ganhos econômicos, ambientais e sociais ao setor produtivo (Silva *et al.*, 2020). No contexto da aplicação de produtos fitossanitários, esses garantem uma aplicação mais eficiente e segura, beneficiando tanto os trabalhadores envolvidos quanto o meio ambiente (Zhang *et al.*, 2022). Um exemplo prático dessa evolução é a utilização da dessecação pré-colheita, uma ferramenta tecnológica de manejo para otimizar uma das etapas mais críticas da produção agrícola.

Na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), a colheita é uma etapa crítica, cujo principal desafio é a desuniformidade na maturação das plantas, que atrasa o processo de desfolha e de perda da umidade dos grãos. O atraso gera um aumento no período de exposição das plantas as variações climáticas e ao ataque de pragas, o que pode resultar em aumento das perdas na colheita (França-Neto *et al.*, 2016; Botelho *et al.*, 2023).

A fim de mitigar os riscos associados ao atraso na colheita, a aplicação de herbicidas dessecantes em pré-colheita consolidou-se como uma alternativa de manejo eficaz (Vargas *et al.*, 2018; Zanatta *et al.*, 2018). Contudo, a eficácia da operação está intrinsecamente ligada à tecnologia de aplicação adotada, que deve promover uma cobertura uniforme e deposição eficaz do produto no alvo (Contiero *et al.*, 2018). De fato, o sucesso de uma aplicação depende de inúmeros fatores, dentre os quais se destacam as condições meteorológicas, a escolha adequada das pontas de pulverização, os parâmetros operacionais (pressão de trabalho, velocidade de trabalho e taxa de aplicação), bem como as propriedades físico-químicas da calda e o espectro de gotas (Cunha, Alves e Marques, 2017; Griesang *et al.*, 2022).

A avaliação da eficácia de herbicidas, tradicionalmente realizada por métodos subjetivos baseados em avaliações visuais, apresenta limitações de acurácia e repetibilidade. Com o advento de novas ferramentas de sensoriamento remoto como Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) dotadas com sensores ópticos, surgem novas possibilidades de avaliação objetiva, baseada em índices gerados a partir de parâmetros espectrais concretos e menos dependentes da subjetividade individual dos avaliadores (Andrade *et al.*, 2022; Faqir *et al.*, 2024; Massruhá, 2020; Ribeiro; Vitória, 2024).

Dentre os índices de vegetação, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que se baseia na reflectância das bandas do infravermelho próximo (NIR) e do

vermelho, consolidou-se como a métrica mais utilizada para a avaliação não destrutiva do vigor e da saúde da vegetação (Hott *et al.*, 2019; Orrilo *et al.*, 2017). A capacidade do NDVI de identificar mudanças fisiológicas da vegetação o torna uma ferramenta viável para avaliar a eficácia de herbicidas. Contudo, o alto custo da obtenção direta dos dados NIR (via sensores multiespectrais ou hiperespectrais), é um entrave à difusão da ferramenta. Uma alternativa apoia-se na utilização de sensores RGB, com menor custo de aquisição, para estimar os dados referentes à banda NIR por meio de algoritmos, sendo obtidos resultados com alta correlação aos sensores multiespectrais (Pranaswi *et al.*, 2024; Teixeira *et al.*, 2021; Xunwei *et al.*, 2024).

Com base no exposto, a hipótese primária deste trabalho postula que a redução da taxa de aplicação, quando associada ao uso de adjuvantes, pode otimizar a eficácia da dessecação pré-colheita na cultura do feijoeiro, resultando em uma aceleração do processo de colheita. Como hipótese secundária, assume-se que a avaliação da eficácia da dessecação pré-colheita por meio de sensoriamento remoto é uma metodologia objetiva e mais eficiente em comparação com as tradicionais avaliações visuais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o impacto da tecnologia de aplicação na eficácia da dessecação pré-colheita do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), a partir de uma revisão sistemática da literatura e de estudos experimentais que integram análises de campo, laboratório e sensoriamento remoto, visando gerar recomendações técnicas otimizadas em condições de cultivo no Cerrado de Minas Gerais.

2.2 Objetivos específicos

- Mapear o panorama científico sobre o uso de ARP e NDVI na agricultura, por meio de análise cienciométrica e bibliométrica, identificando a evolução das publicações, as redes de colaboração e os temas emergentes;
- Avaliar, em condições de campo, o efeito de diferentes taxas de aplicação e da adição de adjuvante na deposição da pulverização e na eficácia da dessecação pré-colheita do feijoeiro;

- Comparar a acurácia e a sensibilidade do índice NDVI obtido por sensores RGB e multiespectral no monitoramento da evolução de dessecação;
- Caracterizar, em laboratório, o efeito de diferentes adjuvantes e taxas de aplicação nas propriedades físico-químicas (tensão superficial e viscosidade) e no espectro de gotas.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A. S. de *et al.* Remote detection of water and nutritional status of soybeans using UAV-based images. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 42, n. 2, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42n2e20210177/2022>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/bG5JmwPB7L83LVLg4Wh6QsS/?lang=en>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- BOTELHO, S. de C. C. *et al.* Épocas de dessecação influenciam na qualidade de grãos e do óleo de soja, Brasília, 2023. **EMBRAPA** (Embrapa Agrossilvipastoril). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1159219/1/2023-cpamt-sccb-epoca-dessecacao-influenciam-qualidade-graos-oleo-soja.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- CONTIERO, R. L.; BIFFE, D. F.; CATAPAN, V. **Tecnologia de Aplicação**. In: BRANDÃO FILHO, J. U. T. *et al.* Hortaliças-fruto [online], Maringá, p. 401-449, 2018. ISBN: 978-65-86383-01-0. DOI: <https://doi.org/10.7476/9786586383010.0015>. Disponível em: <https://books.scielo.org/id/bv3jx/pdf/brandao-9786586383010-15.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2025.
- CUNHA, J. P. A. R.; ALVES, G. S.; MARQUES, R. S. Tensão superficial, potencial hidrogeniônico e condutividade elétrica de caldas de produtos fitossanitários e adjuvantes. **Revista Ciência Agronômica**, [s.l.], v. 48, n. 2, p. 261-270, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170030>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/ZCDYrFVwKFtzPwVXFpnhCLb/>. Acesso em: 17 nov. 2024.
- FAQIR, Y. *et al.* A review on the application of advanced soil and plant sensors in the agriculture sector. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], v. 226, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109385>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169924007762>. Acesso em: 11 abr. 2025.
- FRANÇA-NETO, J. de B. *et al.* **Tecnologia da produção de semente de soja de alta qualidade**. Londrina, Embrapa Soja. Documentos, n. 380, nov. 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1057882/tecnologia-da-producao-de-semente-de-soja-de-alta-qualidade>. Acesso em: 17 nov. 2024.
- GRIESANG, F. *et al.* How do the droplet spectrum uniformity and spray volume of flat-fan nozzles influence fungicide spray distribution quality in soybeans? **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 42, n. 2, p. 20210122, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42n2e20210122/2022>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/rCKcYG48WbSZD8jKt5VPj3c/?lang=en>. Acesso em: 22 abr. 2025.
- HOTT, M. C. *et al.* Uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para estimativa de vigor e de correlações agronômicas em genótipos de capim Cynodon. In: SILVA, C. E. da P. (org.) **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Atena Editora, Ponta Grossa, p. 235-244, 2019.
- MASSRUHÁ, S. M. F. S. *et al.* **A transformação digital no campo rumo à agricultura sustentável e inteligente**. Embrapa Agricultura Digital, [s.l.], 2020. Disponível em:

<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1126214/a-transformacao-digital-no-campo-rumo-a-agricultura-sustentavel-e-inteligente>. Acesso em: 11 abr. 2024.

ORILLO, J. *et al.* Determination of green leaves density using normalized difference vegetation index via image processing of in-field drone-captured image. **Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering**, [s.l.], v. 9, 2017. Disponível em: <https://jtec.utem.edu.my/jtec/article/view/2423>. Acesso em: 17 nov. 2024.

PRANASWI, D. *et al.* Analyzing the synergistic impact of UAV-based technology and knapsack sprayer on weed management, yield-contributing traits, and yield in wheat (*Triticum aestivum* L.) for enhanced agricultural operations. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], v. 219, p. 108796, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108796>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816992400187X>. Acesso em: 17 fev. 2025.

RIBEIRO, L. F. O.; VITÓRIA, E. L. da. Impact of Application Rate and Spray Nozzle on Droplet Distribution on Watermelon Crops Using an Unmanned Aerial Vehicle. **Agriculture**, [s.l.], v. 14, n. 8, p. 1351, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14081351>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/14/8/1351>. Acesso em: 14 out. 2025.

SILVA, L. L. *et al.* Aumentar as competências dos agricultores para a prática de uma agricultura sustentável. **Revista de Ciências Agrárias**, [s.l.], v. 43, n. 2, p. 240-252, 2020. DOI: <https://doi.org/10.19084/rca.19942>. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/19942>. Acesso em: 6 mar. 2025.

TEIXEIRA, A. *et al.* SAFER applications for water productivity assessments with aerial camera onboard a remotely piloted aircraft (RPA). A rainfed corn study in Northeast Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [s.l.], v. 22, p. 100514, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100514>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938521000501>. Acesso em: 6 mar. 2025.

VARGAS, R. L. *et al.* Macronutrients and micronutrients variability in soybean seeds. **Journal of Agricultural Science**, Toronto, v. 10, n. 4, p. 209–222, out. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v10n4p209>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/323568955_Macronutrients_and_Micronutrients_Variability_in_Soybean_Seeds. Acesso em: 15 abr. 2025.

XUNWEI, W. *et al.* Distribution uniformity improvement methods of a large discharge rate disc spreader for UAV fertilizer application. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], v. 220, p. 108928, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108928>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/380258836_Distribution_uniformity_improvement_methods_of_a_large_discharge_rate_disc_spreader_for_UAV_fertilizer_application. Acesso em: 11 abr. 2025.

ZANATTA, E. *et al.* Pre-harvest Desiccation: Productivity and physical and physiological inferences on soybean seeds during storage. **Journal of Agricultural Science**, Richmond Hill, v. 10, n. 6, p. 354–362, jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v10n6p354>.

Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324980442_Pre-harvest_Desiccation_Productivity_and_Physical_and_Physiological_Inferences_on_Soybean_Seeds_During_Storage. Acesso em: 11 abr. 2025.

ZHANG, H. *et al.* Modeling the impact of climatological factors and technological revolution on soybean yield: evidence from 13-major provinces of China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s.l.] v. 19, n. 9, p. 5708, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19095708>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/9/5708>. Acesso em: 12 mai. 2025.

CAPÍTULO 2

Uso do NDVIs obtido por ARPs em maturidade fisiológica e eficácia de aplicação de pesticidas: um mapeamento de tendências, redes de colaboração e lacunas na literatura

RESUMO

A Agricultura 4.0 tem transformado práticas agronômicas por meio da integração de IoT, big data, inteligência artificial e robótica, buscando decisões mais precisas e sustentáveis no campo. Nesse contexto, as ARPs destacam-se como plataformas de sensoriamento capazes de obter imagens multiespectrais de alta resolução, viabilizando índices como o NDVI para monitoramento no campo. Objetivou-se com esse trabalho realizar uma análise bibliométrica e cientométrica sobre NDVIs obtidos por ARPs, visando avaliar a evolução e o impacto das publicações na área, com foco nas subáreas de determinação da maturidade fisiológica e de avaliação da eficácia de aplicação de pesticidas; identificar os principais autores e redes de colaboração; e mapear temas emergentes de pesquisa. Para a realização da pesquisa foram utilizadas as bases de dados Scopus e Web of Science (WoS). O software VOSviewer foi utilizado para a análise dos dados e geração das redes de visualização. Os resultados identificaram um crescimento exponencial das pesquisas que utilizam o índice NDVI obtido por ARPs a partir de 2015, com China e Estados Unidos como polos científicos dominantes. As redes de colaboração mostraram forte organização por nacionalidade e baixa interação internacional, indicando fragmentação no campo. Embora a WoS seja mais ampla numericamente, foi na Scopus que se localizou estudos sobre as aplicações de fronteira, correlações do NDVI com maturidade fisiológica e com eficácia de aplicação de pesticidas. Em síntese, apesar do aumento da produção, as investigações com impacto agrônomo direto ainda são incipientes, o que evidencia uma oportunidade crítica e justifica a necessidade de pesquisas experimentais direcionadas a essas lacunas.

Palavras-chave: agricultura de precisão; mapeamento científico; sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Agriculture 4.0 has transformed agronomic practices through the integration of IoT, big data, artificial intelligence, and robotics, enabling more precise and sustainable decision-making in the field. In this context, PRAs have emerged as powerful sensing platforms capable of capturing high-resolution multispectral imagery and generating vegetation indices such as NDVIs for crop monitoring. This study aimed to conduct a bibliometric and scientometric analysis of NDVIs derived from PRAs to assess the evolution and scientific impact of publications in the field—particularly in the subareas of physiological maturity determination and pesticide application efficiency. Additional objectives included identifying key authors, mapping collaboration networks, and detecting emerging research themes. The analysis was carried out using the Scopus and Web of Science (WoS) databases, and VOSviewer software was employed to generate visualization and collaboration networks. The results revealed exponential growth in NDVI-related research using ARPs from 2015 onwards, with China and the United States standing out as the main global research hubs. Collaboration patterns showed strong clustering by nationality and limited international interaction, indicating structural fragmentation within the field. Although WoS contains a larger overall volume of publications, frontier studies—specifically those correlating NDVI with physiological maturity and pesticide application efficiency—were found exclusively in Scopus. Overall, despite the significant expansion of scientific output, research with direct agronomic impact remains incipient. These findings underscore the need for targeted investigations to bridge existing knowledge gaps and advance high-impact applications of NDVI in modern agriculture.

Keywords: precision agriculture; scientific mapping; remote sensing.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura contemporânea atravessa uma fase de transformação impulsionada pela revolução digital, consolidada sob o conceito de Agricultura digital ou 5.0. Este paradigma refere-se à modernização das práticas agrônômicas por meio da integração de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), big data, inteligência artificial, automação e robótica (Bolfe e Massruhá, 2020). O objetivo central é a coleta e análise de dados espaciais e temporais em larga escala para subsidiar uma tomada de decisão mais assertiva e eficiente (Massruhá, 2020; Queiroz *et al.*, 2021), visando otimizar a produtividade, a rentabilidade e a sustentabilidade dos sistemas de produção (Asbraap, 2022).

Nesse ecossistema digital, as Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs), também conhecidas como drones ou Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), emergiram como plataformas de sensoriamento versáteis e de alto impacto. A literatura científica evidencia uma vasta gama de aplicações para as ARPs no manejo agrícola, incluindo o monitoramento de culturas, a estimativa de produtividade, a pulverização localizada de pesticidas e a distribuição de insumos sólidos (Andrade *et al.*, 2022; Teixeira *et al.*, 2021; Pranaswi *et al.*, 2024; Xunwei *et al.*, 2024; Ribeiro; Vitória, 2024).

A principal vantagem das ARPs reside em sua capacidade de embarcar sensores multiespectrais que, ao captar a reflectância em diferentes comprimentos de onda, permitem o cálculo de índices de vegetação. Dentre eles, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) destaca-se como uma ferramenta consolidada para a avaliação não destrutiva do vigor e da saúde da vegetação (Hott *et al.*, 2019). A flexibilidade temporal e a alta resolução espacial das imagens obtidas por ARPs superam limitações do sensoriamento orbital, como a baixa frequência de revisita e a contaminação por nuvens, oferecendo dados mais precisos e oportunos para a gestão agrícola.

Contudo, apesar do vasto conhecimento sobre o uso geral do NDVI, observa-se uma lacuna na literatura quanto à sua aplicação em duas áreas críticas de decisão agrônômica. A primeira, a determinação do ponto de maturidade fisiológica, é um fator determinante para a qualidade do produto e para a rentabilidade da safra, impactando diretamente a segurança alimentar e a competitividade no mercado. A segunda, a avaliação da eficácia de aplicação de pesticidas, está no centro dos desafios de redução do impacto ambiental e dos custos de produção, alinhando-se às crescentes demandas por uma agricultura mais sustentável. A carência de estudos que integrem sistematicamente o NDVI obtido por ARPs a esses dois processos específicos justifica a necessidade de mapear o estado da arte para identificar

tendências, principais atores e direções de pesquisa futuras. Portanto, a hipótese deste estudo é que, embora a pesquisa sobre NDVI e ARPs seja um campo consolidado, as subáreas relacionadas à maturidade fisiológica e à eficácia de aplicação de pesticidas representam fronteiras científicas incipientes. Para testar esta hipótese, este trabalho foi conduzido com o objetivo de realizar uma análise cientométrica e bibliométrica para (1) quantificar a evolução e o impacto das publicações nessas subáreas; (2) identificar os principais autores e redes de colaboração; e (3) mapear os temas de pesquisa emergentes.

2 METODOLOGIA

2.1 Fonte de dados

Para a presente revisão bibliométrica, foram selecionadas as bases de dados Scopus (Elsevier) e Web of Science (WoS) Core Collection (Clarivate Analytics). A escolha justifica-se pela abrangência multidisciplinar e pelo reconhecimento internacional de ambas como as principais fontes para avaliação da produção científica global, garantindo a recuperação de publicações de alto impacto e a robustez dos metadados para análise cientométrica.

A estratégia de busca foi concebida para maximizar a recuperação de documentos pertinentes. Para tal, foi construído um léxico de termos de busca, incluindo sinônimos e abreviações (e.g., ARP, UAV, drone), que foi aplicado nos campos de título, resumo e palavras-chave. O levantamento dos dados foi realizado em fevereiro de 2025, abrangendo todas as publicações indexadas até a data da extração.

Na base Scopus, a busca foi refinada para a área temática “Ciências Agrárias e Biológicas” (Agricultural and Biological Sciences), sem restrição de período. As consultas foram estruturadas com operadores booleanos, utilizando AND para conectar conceitos distintos (e.g., NDVI AND ARP) e OR para agrupar termos sinônimos (e.g., unmanned aerial vehicles OR uas OR drone). A busca foi conduzida em três etapas sequenciais:

- 1) Busca geral: Para identificar todos os trabalhos que relacionam NDVI e ARPs, com a consulta: (TITLE-ABS-KEY (normalized difference vegetation index OR ndvi) AND TITLE-ABS-KEY (unmanned aerial vehicles OR uas OR drone)).
- 2) Busca específica (maturidade): Adicionando à busca geral os termos: AND (TITLE-ABS-KEY (physiological maturity OR harvest point)).

3) Busca específica (aplicação): Adicionando à busca geral os termos: AND (TITLE-ABS-KEY (pesticide application OR pesticide spraying OR pesticide application process OR agrichemical application efficiency)).

Uma estratégia análoga foi empregada na WoS, com a pesquisa restrita à categoria “Agricultura” (Agriculture), sem restrição de período. As mesmas cadeias de busca foram adaptadas e aplicadas aos campos Tópico, que engloba Título, Resumo e Palavras-chave (tanto do autor quanto do Keyword Plus®). A busca também foi realizada em três etapas sequenciais:

- 1) Busca geral: Para identificar todos os trabalhos que relacionam NDVI e ARPs, com a consulta: ("normalized difference vegetation index" or NDVI (Title) or "normalized difference vegetation index" or NDVI (Abstract) or "normalized difference vegetation index" or NDVI (Keyword Plus ®) and "unmanned aerial vehicles" or uas or drone (Title) or "unmanned aerial vehicles" or uas or drone (Abstract) or "unmanned aerial vehicles" or uas or drone (Keyword Plus ®)).
- 2) Busca específica (maturidade): Adicionando à busca geral os termos: (and "physiological maturity" or "harvest point" (Title) or "physiological maturity" or "harvest point" (Keyword Plus ®)).
- 3) Busca específica (aplicação): Adicionando à busca geral os termos: (and "pesticide application" or "pesticide spraying" or "pesticide application process" or "agrichemical application efficiency" (Title) or "pesticide application" or "pesticide spraying" or "pesticide application process" or "agrichemical application efficiency" (Keyword Plus ®)).

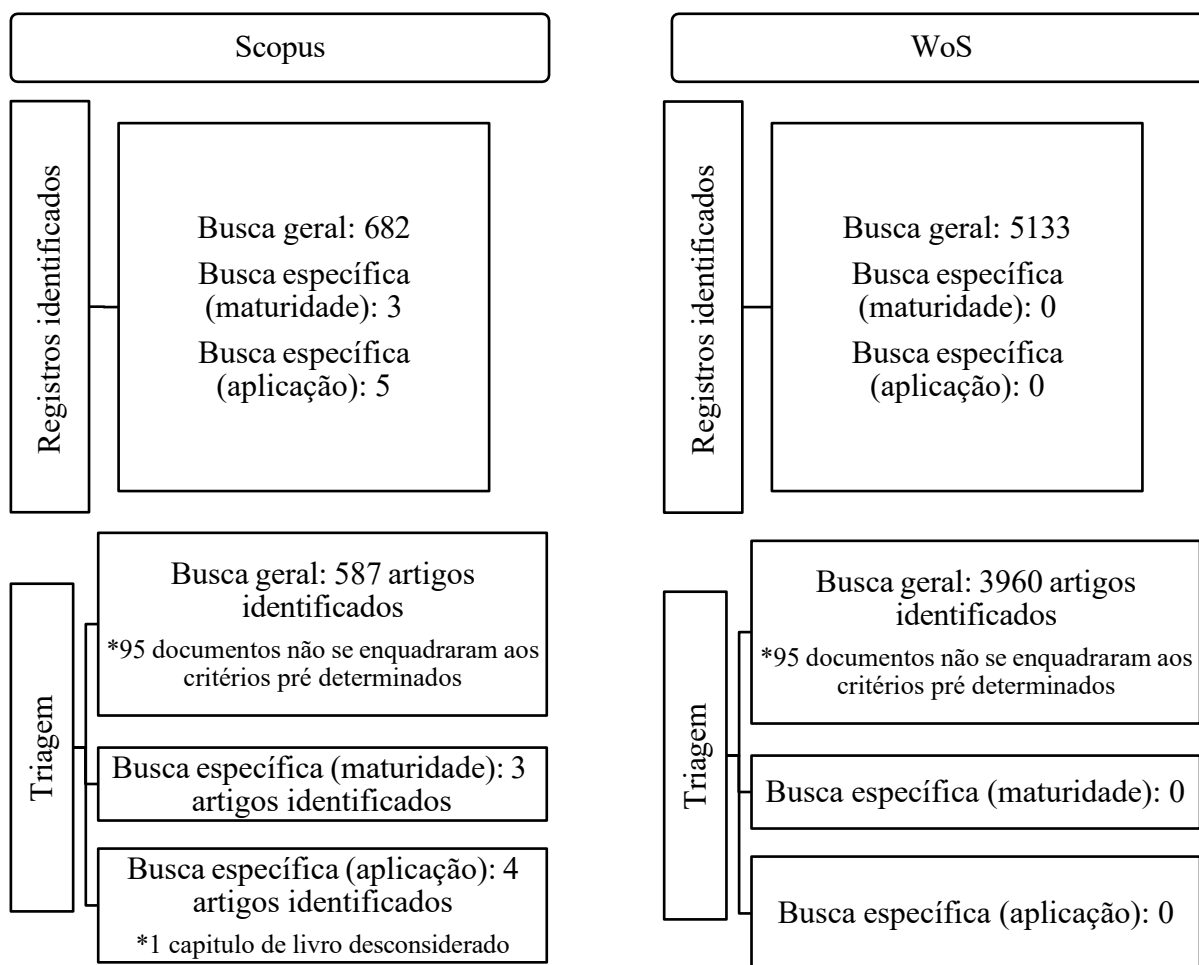
2.2 Seleção dos estudos e extração de dados

O processo de seleção dos estudos seguiu as diretrizes do Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA). Os resultados exportados de ambas as bases foram analisados para remoção de duplicatas. Em seguida, foi realizada uma triagem manual de ambas as bases, de forma isolada, com base na leitura de títulos e resumos, para excluir documentos que não se alinhavam ao escopo da pesquisa (e.g., estudos não agrícolas, revisões de literatura sem dados primários).

Foram selecionados documentos classificados como artigos científicos originais e não duplicados, relativos a estudos agrícolas, sem discriminação quanto ao idioma e data de publicação; a fim de se obter um melhor panorama sobre desenvolvimento das pesquisas sobre

o tema. O fluxograma completo do processo, desde a identificação até a inclusão final dos artigos no portfólio de análise, está detalhado na Figura 1.

Figura 1- Identificação de artigos por meio de bases de dados (Scopus e WoS).



Fonte: Diagrama de fluxograma do processo de identificação, triagem e seleção dos artigos, 2025.

2.3 Análise de dados e visualização

A análise bibliométrica e a geração das redes de visualização foram realizadas com o software VOSviewer (versão 1.6.20). Foram conduzidas análises de coautoria (entre autores e países) e de coocorrência de palavras-chave. Para a análise de coautoria, empregou-se o método de contagem completa (full counting). Na análise de coocorrência, foi realizado um processo de limpeza e normalização dos termos em um dicionário (thesaurus) para unificar variações semânticas (e.g., 'drone', 'drones'). Para garantir a relevância estatística e a clareza dos mapas de rede, estabeleceu-se um limiar mínimo de três ocorrências para que um item (autor, país ou palavra-chave) fosse incluído na análise. Este limiar representa um balanço entre a remoção de

ruído (itens de baixa frequência) e a preservação da representatividade dos dados, evitando a exclusão de conceitos emergentes (Van Eck e Waltman, 2014; Zupic e Čater, 2015). Nos mapas gerados, a dimensão dos nós é proporcional à frequência do item, as cores indicam a formação de clusters temáticos, e a espessura das linhas representa a força da relação (colaboração ou coocorrência) entre os nós (Van Eck e Waltman, 2020).

2.4 Delimitação do estudo e limitações reconhecidas

A presente pesquisa delimita-se às publicações indexadas nas bases Scopus e WoS. Esta decisão metodológica implica a não inclusão da base *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), uma escolha fundamentada em critérios de consistência e de padronização de dados. Embora a SciELO seja um repositório de relevância para a ciência latino-americana, a extração de metadados em larga escala para análises bibliométricas pode apresentar desafios de compatibilidade e normalização, em comparação com as estruturas de dados padronizadas oferecidas pela Scopus e pela WoS.

Reconhece-se, portanto, que esta delimitação constitui uma limitação do estudo. A potencial consequência é a sub-representação de pesquisadores e instituições de países lusófonos, cuja produção científica é frequentemente veiculada em periódicos indexados predominantemente na SciELO. Adicionalmente, como em toda revisão bibliométrica, outras limitações inerentes incluem a exclusão de livros, teses e anais de conferências não indexados. Por fim, a análise de coocorrência de palavras-chave é dependente da qualidade e consistência dos metadados fornecidos pelas editoras, podendo ser influenciada por inconsistências no seu preenchimento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados quantitativos da busca inicial corroboram a hipótese central deste estudo: a pesquisa que conecta NDVI de ARPs às subáreas de maturidade fisiológica e eficácia de aplicação é incipiente. A busca geral identificou um volume expressivo de 4.547 artigos (587 na Scopus e 3.960 na WoS). Em nítido contraste, as buscas específicas resultaram no isolamento de apenas sete artigos, todos provenientes da base Scopus, sendo três sobre maturidade fisiológica e quatro sobre eficácia na aplicação de defensivos agrícolas. Essa disparidade de ordens de magnitude demonstra que, embora o campo geral seja robusto, as aplicações especializadas investigadas representam uma fronteira científica ainda largamente inexplorada.

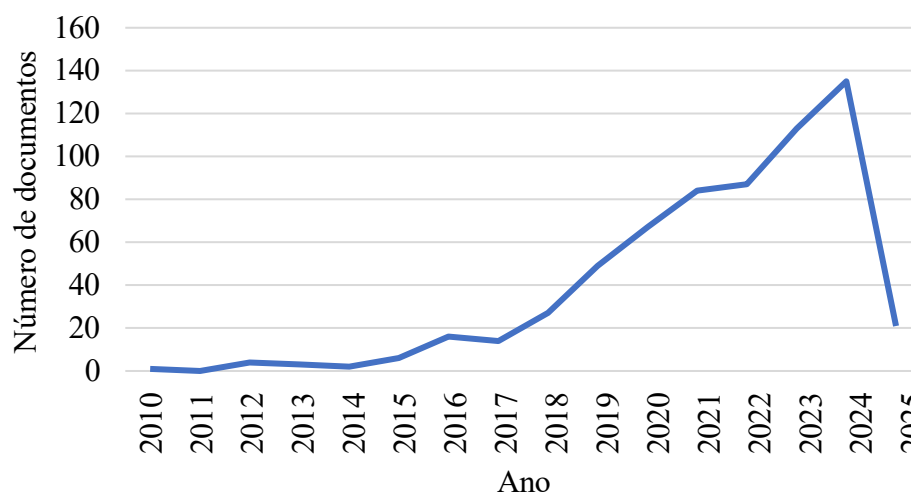
Uma análise mais aprofundada do conteúdo dos três artigos recuperados na subárea de maturidade fisiológica revela uma nuance importante. Os trabalhos de Cruz-Grimaldo *et al.* (2025), Li *et al.* (2023) e Zang *et al.* (2021) focam primariamente na predição de produtividade (yield) e na avaliação de desempenho de culturas, e não diretamente na determinação de um ponto ótimo de colheita com base na maturidade fisiológica. Essa observação é crucial, pois sugere que a lacuna na literatura é ainda mais profunda do que os números iniciais indicam, reforçando a originalidade e a necessidade deste estudo.

De forma análoga, os artigos recuperados na subárea de eficácia de aplicação também apresentam um foco indireto. A maioria dos estudos (Feng *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2019) utiliza o NDVI para detectar danos causados por pragas ou para monitorar os efeitos de herbicidas e desfolhantes. Ou seja, avaliam o resultado de uma injúria ou de um tratamento, e não a eficiência do processo de aplicação (e.g., qualidade da deposição, uniformidade de cobertura, potencial de deriva). O trabalho de Raj *et al.* (2019), por sua vez, é uma revisão mais ampla, sem um estudo de caso aprofundado. Fica evidente, portanto, que a aplicação do NDVI para otimizar a tecnologia de aplicação permanece como uma área de pesquisa aberta e de grande potencial.

A análise da evolução temporal das publicações (Figuras 2 e 3) revela um campo de pesquisa em franca expansão. Observa-se um claro ponto de inflexão a partir de 2015, com um crescimento exponencial que culminou em seu pico no ano de 2024, quando foram registrados 135 artigos na Scopus e 649 na WoS. A força dessa tendência é tal que, até o momento da busca (fevereiro de 2025), já haviam sido publicados 21 e 169 artigos, respectivamente, indicando a continuidade do alto volume de produção.

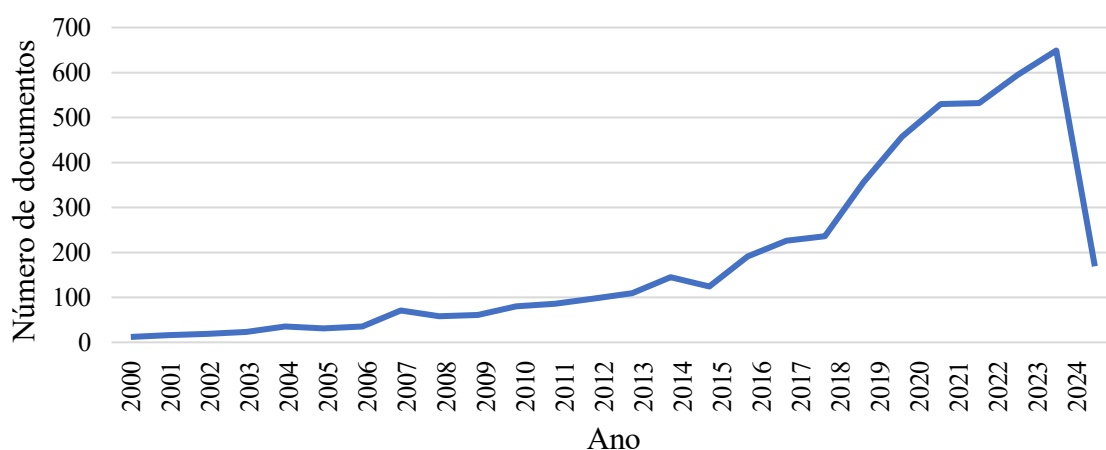
Conforme aponta Wang *et al.* (2015), tal aumento é um indicador-chave do avanço e do interesse científico em um determinado domínio. Este "boom" pode ser atribuído a uma confluência de fatores, como a redução dos custos da tecnologia de drones, o avanço na miniaturização e precisão dos sensores embarcados e a maior acessibilidade a plataformas de processamento de dados em nuvem. É crucial notar, no entanto, que a maior parte dessa produção se concentra em temas já consolidados, como a avaliação do estado nutricional e hídrico, estimativas de produtividade e mapeamento da cobertura vegetal. Este cenário, ao ser contrastado com a escassez de trabalhos nas subáreas de maturidade e eficácia, reforça o caráter inovador e a oportunidade de pesquisa aqui investigados.

Figura 2 - Evolução do número de publicações na base Scopus sobre pesquisas científicas com o índice NDVI obtido por ARPs.



Fonte: Elaborada pela autora segundo a base Scopus, 2025.
Dados de 2025 obtidos até fevereiro.

Figura 3 - Evolução do número de publicações na base WoS sobre pesquisas científicas com o índice NDVI obtido por ARPs.



Fonte: Elaborada pela autora segundo a base Web of Science, 2025.
Dados de 2025 obtidos até fevereiro.

3.1 Contribuições e co-autoria

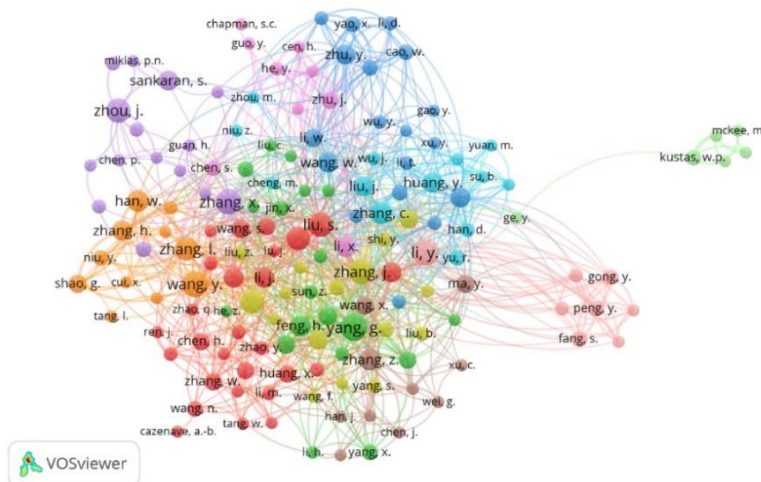
A análise da distribuição geográfica da produção científica revela uma forte concentração em poucos países. Na base Scopus, a liderança é da China (178 artigos) e dos Estados Unidos (144), seguidos por Espanha (37), Itália (34) e Brasil (32). Em contraste, na base Web of Science (WoS), a ordem da liderança se inverte, com os Estados Unidos (1.524) e a China (1.265) à frente, mas com o Brasil ocupando uma expressiva terceira posição (448), seguido por Espanha (280) e Itália (276). Essa proeminência de EUA e China reflete seus

robustos ecossistemas de pesquisa e desenvolvimento em tecnologia agrícola, enquanto a forte presença brasileira, especialmente na WoS, destaca a relevância do país na pesquisa agrônômica mundial.

Um olhar aprofundado sobre a contribuição brasileira revela os principais atores em cada base de dados. Na Scopus, os autores de destaque são CASARI, R. A. D. C. N. e MARIN, D. B., com três produções cada. Na WoS, a lista de pesquisadores é mais extensa, incluindo FONTANA, D. (19), TEODORO, P. (16), FERRAZ, G. A. E. S. (13), SANTOS, A. F. (12), SILVA, R. P. (12), e LAMPARELLI, R. A. C. (12). A trajetória da produção brasileira mostra um marco temporal claro, com as publicações surgindo a partir de 2017 e um aumento notável após 2020, culminando em 9 artigos publicados ao longo de 2024 na base Scopus, o ano mais produtivo para o país nesta base.

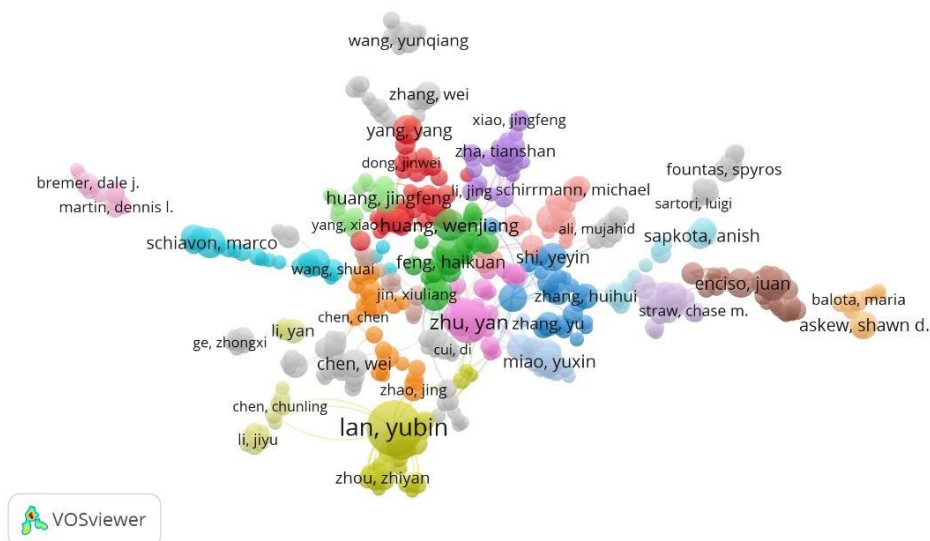
A análise das redes de coautoria oferece um panorama da estrutura social do campo, revelando padrões distintos entre as bases de dados. Na Scopus (Figura 4), observa-se uma rede com um grande componente conectado, indicando que a maioria dos autores está inserida em alguma colaboração. No entanto, a formação de grupos bem definidos, com poucas conexões entre si, sugere que a pesquisa se desenvolve em "escolas de pensamento" ou núcleos de colaboração que, embora internamente coesos, são relativamente isolados. Essa tendência à fragmentação é ainda mais pronunciada na rede da WoS (Figura 5), que revela uma atuação predominantemente independente entre os pesquisadores, com pouca conexão geral entre os autores.

Figura 4 - Rede de autores conectados por coautoria, com pelo menos 3 documentos publicados ao longo do período (2010 – 2025), base Scopus.



Fonte: Elaborada pela autora via VOSviewer.

Figura 5 - Rede de autores conectados por coautoria, com pelo menos 3 documentos publicados ao longo do período (2000 – 2025), base WoS.

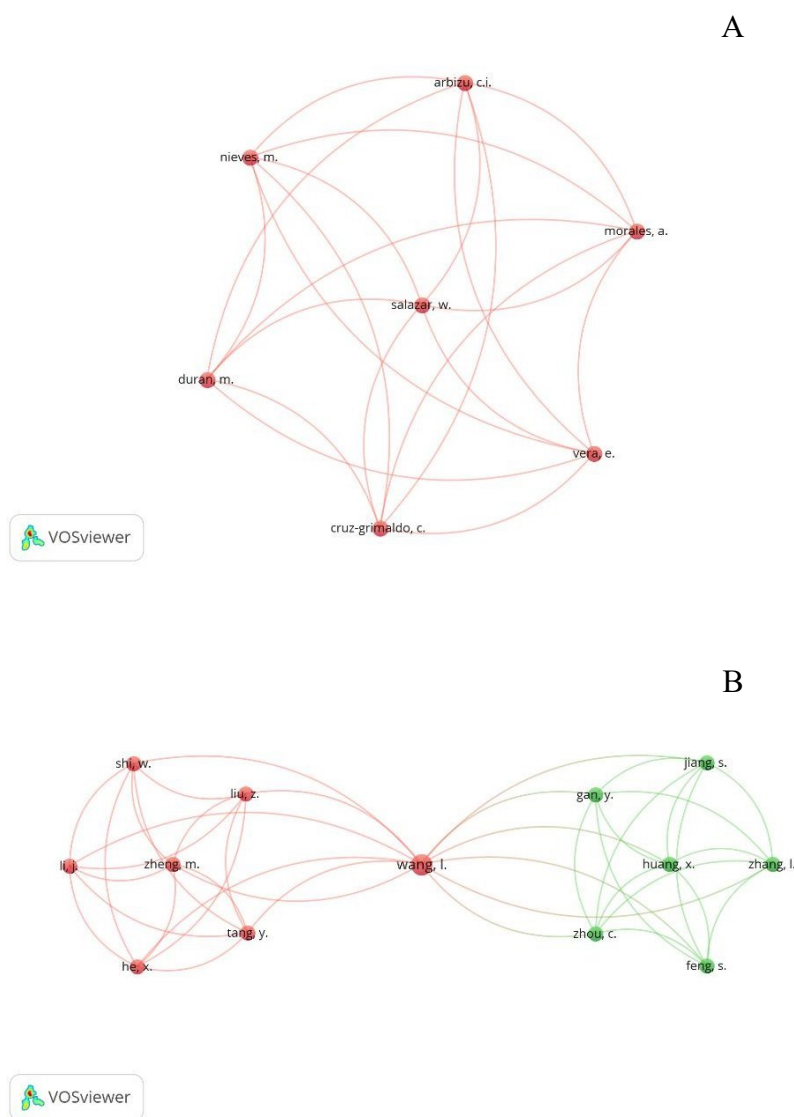


Fonte: Elaborada pela autora via VOSviewer, 2025.

A análise se torna ainda mais reveladora ao focar nas subáreas de fronteira investigadas neste estudo (Figura 6). Como esperado em campos incipientes, as redes são esparsas, refletindo o baixo número de publicações. Os trabalhos originam-se de um grupo seleto de países: China (5), Índia (1) e Estados Unidos (1). Para a subárea de maturidade fisiológica (Figura 6A), a rede de autores mostra-se fragmentada. Contudo, para a subárea de eficácia de aplicação (Figura 6B), a identificação do autor Wang L. como um ponto de conexão entre trabalhos é um achado

de grande relevância. Este autor pode representar o embrião de um núcleo de pesquisa especializado ou um pesquisador-chave cuja metodologia serve de ponte, ainda que inicial, entre diferentes abordagens.

Figura 6 - Rede de autores conectados por coautoria, a partir da busca isolada na base Scopus por trabalhos com a utilização do índice NDVI obtido por ARPs correlacionados à maturidade fisiológica das plantas (A) e à eficácia de aplicação de defensivos agrícolas (B) publicados ao longo do período (2010 – 2025).



Fonte: Elaborada pela autora via VOSviewer.

3.2 Rede de citações

A análise de cocitação permite mapear a estrutura intelectual de um campo de pesquisa, identificando os trabalhos que funcionam como seus pilares teóricos e metodológicos. Parte-se do princípio de que autores referenciam estudos que consideram relevantes para o avanço de suas próprias pesquisas (Culnan, 1987; Tahai; Meyer, 1999). Dessa forma, obras frequentemente citadas em conjunto por outros trabalhos (cocitadas) tendem a abordar tópicos correlacionados ou a compor o conhecimento fundamental da área.

A análise dos artigos mais influentes, cujos detalhes são apresentados nas Tabelas 1 e 2, revela um achado central: o campo de pesquisa sobre NDVI e ARPs é fortemente ancorado em literatura clássica, com mais de uma década de publicação.

Tabela 1 - Lista dos dez autores com o maior número de citações dentre os artigos encontrados na base Scopus.

Autores	Ano	Título	Nº de citações
ZARCO-TEJADA P. J.; GONZÁLEZ-DUGO V.; BERNI J. A. J.	2012	Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera	790
DANDOIS, JONATHAN P.; ELLIS, ERLE C	2013	High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision	485
NEVAVUORI P.; NARRA N.; LIPPING T.	2019	Crop yield prediction with deep convolutional neural networks	461
BALUJA, J.; DIAGO, M. P.; BALDA, P.; <i>et al.</i>	2012	Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV)	389
PRIMICERIO, J.; DI GENNARO, S. F.; FIORILLO, E.; <i>et al.</i>	2012	A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture	332
HASSAN, M. A.; YANG, M.; RASHEED, A.; <i>et al.</i>	2019	A rapid monitoring of NDVI across the wheat growth cycle for grain yield prediction using a multi-spectral UAV platform	320

WANG, W.; WANG, M.; WANG, S.; WU, Y.	2015	Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images	301
TORRES-SÁNCHEZ, J.; LÓPEZ-GRANADOS, F.; PEÑA, J. M.	2015	An automatic object-based method for optimal thresholding in UAV images: Application for vegetation detection in herbaceous crops	263
WAN, L.; CEN, H.; ZHU, J.; <i>et al.</i>	2020	Grain yield prediction of rice using multi-temporal UAV-based RGB and multispectral images and model transfer – a case study of small farmlands in the South of China	258
SU, J.; LIU, C.; COOMBES, M.; HU, X.; <i>et al.</i>	2018	Wheat yellow rust monitoring by learning from multispectral UAV aerial imagery	240

Fonte: Elaborada pela autora a partir da consulta direta na ferramenta visão geral de citações da plataforma Scopus.

Tabela 2 - Lista dos dez autores com o maior número de citações dentre os artigos encontrados na base WoS.

Autores	Ano	Título	Nº de citações
ZHANG, C. H.; KOVACS, J. M.	2012	The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review	1.277
MULLA, D. J.	2013	Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps	1.257
MEYER, G. E.; NETO, J. C.	2008	Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications	755
WU, C. Y.; NIU, Z.; HUANG, W. J.; <i>et al.</i>	2008	Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation	694
CHEN, W.; XIE, X. S.; MA, J. Q.; <i>et al.</i>	2017	A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility	687
SIX, J.; ELLIOTT, E. T.	2000	Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy	623

PAUSTIAN, K.			
BOLTON, D. K.; FRIEDL, M. A.	2013	Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics	586
YUAN, W. P.; LIU, S.; WOFSY, S. C.; <i>et al.</i>	2007	Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes	584
ORTIZ, R; SAYRE, K. D.; REYNOLDS, M.	2008	Climate change: Can wheat beat the heat?	505
SUN, W. Y.; SONG, X. Y.; ZHAO, G. J.; <i>et al.</i>	2015	Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau	489

Fonte: Elaborada pela autora a partir da consulta direta na ferramenta relatório de citação da plataforma WoS.

Este padrão é evidenciado pelo fato de que, entre os dez trabalhos mais citados pelos artigos da base Scopus, figura um artigo de 2012, enquanto na base WoS, um trabalho seminal do ano 2000 permanece como um dos mais referenciados.

Esta observação é importante, pois indica que, embora a tecnologia de ARPs (drones) e sensores seja recente e esteja em rápida evolução, os métodos e conceitos primários para a interpretação dos dados de sensoriamento remoto são mais antigos e consolidados. A pesquisa atual, portanto, não ocorre em um vácuo; mas constrói-se sobre uma base teórica e metodológica bem estabelecida, aplicando tecnologias novas a princípios científicos já validados.

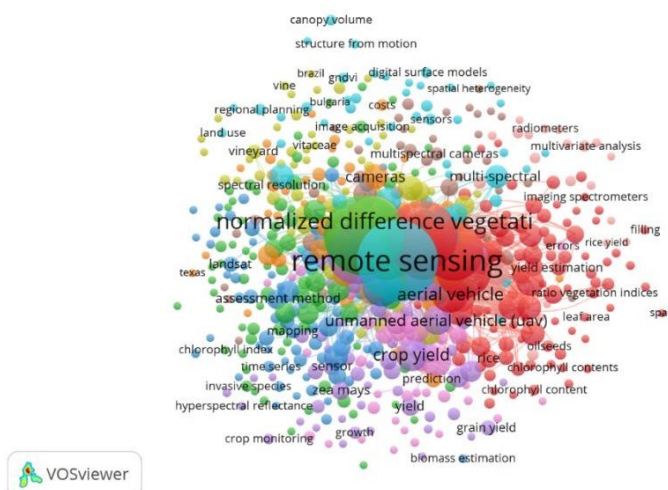
3.3 Rede de conexão entre palavras – chave

A análise de co-ocorrência de palavras-chave é uma técnica poderosa para mapear a estrutura temática de um campo. As palavras-chave refletem o foco central dos estudos, indo além do título e do resumo para capturar o raciocínio dos autores e o avanço científico (Miguéis *et al.*, 2013).

A análise das redes (Figuras 7 e 8) revela que a pesquisa na área é dominada por três grupos temáticos principais, que funcionam como os pilares conceituais do campo:

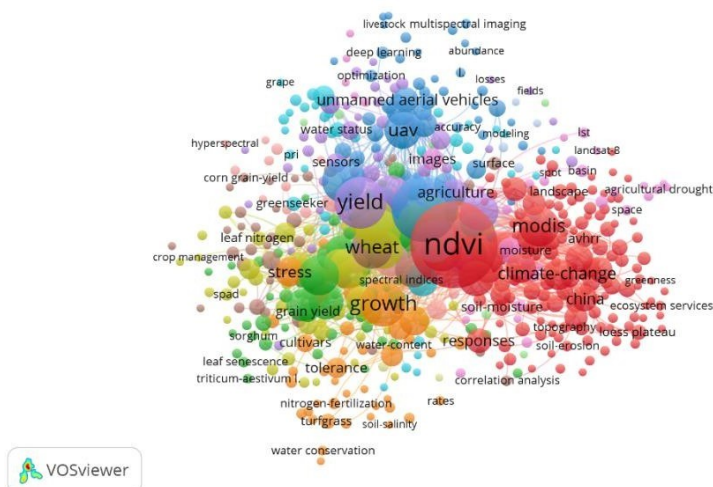
1. O Cluster Tecnológico, ancorado na ferramenta: Composto por termos como remote sensing, unmanned aerial vehicles (UAVs) e UAV. Este grupo representa o aparato tecnológico utilizado para a coleta de dados.
2. O Cluster Metodológico, ancorado na métrica: Centrado nos termos NDVI, normalized difference vegetation index e vegetation index. Este grupo representa a principal métrica analítica derivada da tecnologia.
3. O Cluster de Aplicação, ancorado no objetivo: Inclui termos como precision agriculture, vegetation, yield e reflectance. Este grupo descreve o domínio e os objetivos práticos da pesquisa.

Figura 7 - Rede de ocorrência de palavras-chave dos documentos obtidos pela base de dados Scopus, com número mínimo de ocorrências limitado a 3, com 160 resultados.



Fonte: Elaborada pela autora via VOSviewer.

Figura 8 - Rede de ocorrência de palavras-chave dos documentos obtidos pela base de dados Web of Science, com número mínimo de ocorrências limitado a 3, com 550 resultados.



Fonte: Elaborada pela autora via VOSviewer.

A alta frequência e centralidade desses termos (representadas pelo tamanho maior nos mapas) confirmam que eles formam o núcleo do campo. Mais importante, a forte interconexão entre eles demonstra que a pesquisa raramente foca em um desses aspectos de forma isolada. Pelo contrário, a abordagem padrão é a integração da tecnologia (UAV) para capturar uma métrica (NDVI) visando uma aplicação agrônômica (agricultura de precisão/produktividade). A escala de cores, que no VOSviewer frequentemente representa a evolução temporal, sugere que termos ligados a UAVs são mais recentes (cores "mais quentes") do que o termo *remote sensing*, refletindo a própria evolução tecnológica do campo.

Um claro paradoxo emerge da análise cienciométrica: enquanto as últimas décadas foram marcadas por uma rápida integração de novas tecnologias, a colaboração entre os próprios pesquisadores não evoluiu no mesmo ritmo, representando um gargalo significativo para o avanço do conhecimento. Assim, embora a interoperabilidade entre tecnologias seja uma realidade, é a interação entre pesquisadores, instituições e países que se firma como o desafio a ser superado para acelerar, de fato, a produção científica no campo.

A análise cienciométrica revela, portanto, uma assimetria notável: enquanto a interoperabilidade entre tecnologias avançou rapidamente, a colaboração entre pesquisadores não evoluiu no mesmo ritmo, indicando que a fragmentação das redes de pesquisa pode ser um gargalo para o avanço do conhecimento. Corroborando a hipótese central deste estudo, as investigações nas subáreas de fronteira são pontuais e incipientes. Os estudos que correlacionam o índice NDVI obtido por ARPs com a determinação da maturidade fisiológica ou com a eficácia na aplicação de pesticidas são notavelmente escassos, o que reforça a urgência e a originalidade de novas pesquisas dedicadas a explorar estas frentes de investigação.

4 CONCLUSÃO

Este estudo cienciométrico confirma o crescimento exponencial, a partir de 2015, das pesquisas que utilizam o índice NDVI obtido por ARPs. Neste cenário global, China e Estados Unidos consolidam-se como os polos dominantes de produção científica. A análise das redes de colaboração revelou, contudo, que a nacionalidade é um fator determinante, com a pesquisa frequentemente se organizando em grupos nacionais com pouca interação entre si, sugerindo uma fragmentação estrutural no campo.

A principal contribuição deste trabalho, no entanto, reside na identificação de uma lacuna crítica na literatura. Embora a base Web of Science se mostre numericamente mais

abrangente, foi exclusivamente na base Scopus que se localizaram os estudos que abordam as aplicações de fronteira: a correlação do NDVI com a maturidade fisiológica e com a eficácia de aplicação de pesticidas. Portanto, conclui-se que, apesar do volume crescente de publicações na área geral, as investigações voltadas para as aplicações de maior impacto agrônômico direto permanecem incipientes e subexploradas, reforçando a urgência e a relevância de novas pesquisas que se dediquem a estas frentes. Diante da lacuna de conhecimento aqui confirmada, os capítulos subsequentes desta tese apresentam estudos experimentais desenhados para investigar, em campo e em laboratório, essas fronteiras de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, A. S. de *et al.* Remote detection of water and nutritional status of soybeans using UAV-based images. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 42, n. 2, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42n2e20210177/2022>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/bG5JmwPB7L83LVLg4Wh6QsS/?lang=en>. Acesso em: 10 mar. 2025.

ASBRAAP - Associação Brasileira de Agricultura de Precisão e Digital. **Definições de Agricultura de Precisão**.

BOLFE, E. L.; MASSRUHÁ, S. M. F. S. A transformação digital e a sustentabilidade agrícola. **AgroANALYSIS**, [s.l.], v. 40, n. 3, p. 32-34, 2020. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1121734>. Acesso em: 12 mar. 2025.

CULNAN, M. J. Mapping the intellectual structure of MIS, 1980-1985: a co-citation analysis. **Management of Information System Quarterly**, [s.l.], v. 11, n. 3, p. 341-353, 1987. DOI: <https://doi.org/10.2307/248680>. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/248680>. Acesso em: 10 mar. 2025.

CRUZ-GRIMALDO, C. *et al.* Yield predictions of ‘Del Cerro’ cotton (*Gossypium hirsutum* L.) germplasm by multispectral monitoring in the north coast of Peru. **CHILEAN JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH**, [s.l.], v. 85, 2025. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-58392025000100015>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/385553280_Yield_predictions_of_'Del_Cerro'_cotton_Gossypium_hirsutum_L_germplasm_by_multispectral_monitoring_in_the_north_coast_of_Peru. Acesso em: 20 mar. 2025.

FENG, S. *et al.* Detection of Rice Leaf Folder in Paddy Fields Based on Unmanned Aerial Vehicle-Based Hyperspectral Images. **Agronomy**, [s.l.], v. 14, 2024, . DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomia14112660>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/385743246_Detection_of_Rice_Leaf_Folder_in_Paddy_Fields_Based_on_Unmanned_Aerial_Vehicle-Based_Hyperspectral_Images. Acesso em: 10 mar. 2025.

HOTT, M. C. *et al.* Uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para estimativa de vigor e de correlações agronômicas em genótipos de capim Cynodon. In: SILVA, C. E. da P. (org.) **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Atena Editora, Ponta Grossa, p. 235-244, 2019.

LI, Y. *et al.* Abundance considerations for modeling yield of rapeseed at the flowering stage. **Front. Plant Sci.**, Sec. Technical Advances in Plant Science, [s.l.], v. 14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1188216>. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10420083/>. Acesso em: 15 mar. 2025.

MASSRUHÁ, S. M. F. S. *et al.* **A transformação digital no campo rumo à agricultura sustentável e inteligente**. Embrapa Agricultura Digital, [s.l.], 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1126214/a-transformacao-digital-no-campo-rumo-a-agricultura-sustentavel-e-inteligente>. Acesso em: 11 abr. 2025.

MIGUÉIS, A. *et al.* The importance of keywords in scientific articles in Pharmaceutical Sciences, submitted in Estudo Geral: a comparative study of terms assigned in MEDLINE. **Revista de Ciência da Informação e Documentação**, [s.l.], v. 4 n. 2, 2013. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2178-2075.v4i2p112-125>. Disponível em: <https://brapci.inf.br/v/40467>. Acesso em: 10 mar. 2025.

MORAES, H. M. F. *et al.* A bibliometric and scientometric analysis on the use of UAVs in agriculture, livestock and forestry. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 53, n. 8, p. e20220130, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20220130>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/Rh3jX5hwCxBMMknZHj9BmKd/?lang=en>. Acesso em: 10 mar. 2025.

QUEIROZ, D. M. *et al.* **Agricultura digital**. São Paulo, Oficina de Textos, e. 2, 2021.

RAJ, R. *et al.* Precision Agriculture and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). **Unmanned Aerial Vehicle: Applications in Agriculture and Environment**, [s.l.], p. 7–23, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-2069-3.ch005>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/377846153_Precision_Agriculture_and_Unmanned_Aerial_Vehicles_UAVs. Acesso em: 15 mar. 2025.

RIBEIRO, L. F. O.; VITÓRIA, E. L. da. Impact of Application Rate and Spray Nozzle on Droplet Distribution on Watermelon Crops Using an Unmanned Aerial Vehicle. **Agriculture**, [s.l.], v. 14, n. 8, p. 1351, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14081351>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/14/8/1351>. Acesso em: 20 mar. 2025.

SONG, C. *et al.* Particle deposition distribution of multi-rotor UAV-based fertilizer spreader under different height and speed parameters. **Drones**, [s.l.], v. 7, n. 7, p. 425, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones7070425>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-446X/7/7/425>. Acesso em: 10 mar. 2025.

TAHAI, A.; MEYER M. J. A revealed preference study of management journals' direct influences. **Strategic Management Journal**, [s.l.], v. 20, n. 3, p. 279-296, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199903\)20:3<279::AID-SMJ33>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199903)20:3<279::AID-SMJ33>3.0.CO;2-2). Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/3094106>. Acesso em: 15 mar. 2025.

TEIXEIRA, A. *et al.* SAFER applications for water productivity assessments with aerial camera onboard a remotely piloted aircraft (RPA). A rainfed corn study in Northeast Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [s.l.], v. 22, p. 100514, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100514>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938521000501>. Acesso em: 10 mar. 2025.

TRINDADE, F. S. *et al.* Relação espectro-temporal de índices de vegetação com atributos do solo e produtividade da soja. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, [s.l.], v. 62, 2019. DOI: <https://doi.org/10.22491/rca.2019.2928>. Disponível em: <https://ajaes.ufra.edu.br/index.php/ajaes/article/view/2928>. Acesso em: 10 mar. 2025.

VAN ECK, N.J., WALTMAN, L. Visualizing bibliometric networks. In H. F. Moed, W. Glänzel, & U. Schmoch (Eds.), *Handbook of Quantitative Science and Technology Research*.

Springer, [s.l.], pp 285–320, 2014. Disponível em:
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-10377-8_13. Acesso em: 15 mar. 2025.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. **VOSviewer Manual**. Universiteit Leiden, CWTS
 Meaningful metrics. 2020.

XUNWEI, W. *et al.* Distribution uniformity improvement methods of a large discharge rate disc spreader for UAV fertilizer application. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], v. 220, p. 108928, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108928>.
 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169924003193>.
 Acesso em: 10 mar. 2025.

WANG, L. *et al.* Characteristics of international collaboration in sport sciences publications and its influence on citation impact. **Scientometrics**, [s.l.], v. 105, n.2, p. 843-62, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1735-y>. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11192-015-1735-y>. Acesso em: 10 mar. 2025.

WANG, L. *et al.* Prediction of Thrips Damage Distribution in Mango Orchards Using a Novel Maximum Likelihood Classifier. **Agronomy**, [s.l.], 2024, 14. DOI:
<https://doi.org/10.3390/agronomy14040795>. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/379765550_Prediction_of_Thrips_Damage_Distribution_in_Mango_Orchards_Using_a_Novel_Maximum_Likelihood_Classifier. Acesso em:
 20 abr. 2025.

ZANG, C. *et al.* Crop Performance Evaluation of Chickpea and Dry Pea Breeding Lines Across Seasons and Locations Using Phenomics Data. **Front. Plant Sci.**, [s.l.], Sec. Technical Advances in Plant Science, v. 12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.640259>.
 Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/349598591_Crop_Performance_Evaluation_of_Chickpea_and_Dry_Pea_Breeding_Lines_Across_Seasons_and_Locations_Using_Phenomics_Data. Acesso em: 20 mar. 2025.

ZHANG, L. *et al.* Study on cotton defoliation effect monitoring and formulation map generation based on multi-spectral remote sensing of UAV. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], 2024. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202503.1460.v1>. Disponível em: <https://prereview.org/es-419/preprints/doi-10.20944-preprints202503.1460.v1>. Acesso em: 10 mar. 2025.

ZHANG S. *et al.* Study on weed control of plant protection UAV and effect evaluation in rape filed. **Unmanned Aerial Vehicle: Applications in Agriculture and Environment**, [s.l.], p. 7–23, 2019. DOI: <https://doi.org/10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2019.09.09>. Disponível em: <https://www.aminer.cn/pub/602402268087bc1199fb74c6>. Acesso em: 15 abr. 2025.

ZUPIC, I.; ČATER, T. Bibliometric methods in management and organization. **Organizational Research Methods**, [s.l.], v. 18, p. 429 – 472, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/254970530_Bibliometric_methods_in_management_and_organization. Acesso em: 15 mar. 2025.

CAPÍTULO 3

Sensoriamento remoto, taxa de aplicação e adjuvante na eficácia da dessecação pré-colheita
do feijoeiro

RESUMO

A uniformidade da maturação é um desafio na colheita do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), sendo a dessecação pré-colheita uma estratégia fundamental para alcançar essa uniformização. Este estudo objetivou avaliar o impacto de três taxas de aplicação (50, 100 e 150 L ha⁻¹) e da adição de um adjuvante organosiliconado na eficácia da dessecação pré-colheita do feijoeiro, ao longo de duas safras. Os ensaios foram conduzidos em delineamento de blocos ao acaso, em esquema fatorial 2 x 3 + 1 (presença/ausência de adjuvante x três taxas de aplicação + testemunha absoluta), com quatro repetições. As parcelas possuíam 240 m², com área útil central de 30 m². As aplicações foram realizadas por pulverizador terrestre autopropelido equipado com pontas de indução de ar (AVI 110025), na pressão de trabalho de 415 kPa (60 PSI). As diferentes taxas foram obtidas exclusivamente pela variação da velocidade de trabalho. Avaliou-se a deposição de calda, a eficácia agrônômica (desfolha e umidade de grãos) e a resposta espectral (NDVI) por sensores multiespectral e RGB (com NIR estimado). A taxa de aplicação de 100 L ha⁻¹ promoveu deposição e eficácia de dessecação semelhantes a 150 L ha⁻¹ e superiores a 50 L ha⁻¹, consolidando-se como a alternativa de maior eficácia técnica e operacional. O adjuvante organosiliconado não alterou a deposição física da calda, mas acelerou significativamente a perda de umidade dos grãos, indicando que seu benefício reside na otimização da absorção foliar, e não na retenção. No monitoramento, embora ambos os sensores tenham detectado a senescência, a correlação do sensor RGB degradou-se após a aplicação, rejeitando a hipótese de que este possa substituir o multiespectral com a mesma acurácia. Conclui-se que a taxa de 100 L ha⁻¹ associada ao adjuvante organosiliconado maximiza a eficácia da dessecação, processo que exige sensores multiespectrais para um monitoramento preciso.

Palavras-chave: deposição de calda; diquat; NDVI; organosiliconado; *Phaseolus vulgaris* L.; RGB; sensores multispectrais.

ABSTRACT

Uniformity of maturation is a challenge in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) harvesting, and pre-harvest desiccation is a key strategy for achieving this uniformity. This study aimed to evaluate the impact of three application rates (50, 100, and 150 L ha⁻¹) and the addition of an organosilicone adjuvant on the efficacy of pre-harvest desiccation in common beans over two growing seasons. The trials were conducted using a randomized complete block design in a 2 x 3 + 1 factorial arrangement (presence/absence of adjuvant x three application rates + absolute control) with four replications. Plots measured 240 m², with a central net area of 30 m². Applications were performed using a self-propelled ground sprayer equipped with air-induction nozzles (AVI 110025) at a working pressure of 415 kPa (60 PSI). The different rates were obtained solely by varying the operating speed. Evaluations included spray deposition, agronomic efficacy (defoliation and grain moisture), and spectral response (NDVI) using multispectral and RGB sensors (with estimated NIR). The 100 L ha⁻¹ application rate resulted in deposition and desiccation efficacy similar to the 150 L ha⁻¹ rate and superior to the 50 L ha⁻¹ rate, establishing itself as the most technically and operationally efficient alternative. The organosilicone adjuvant did not alter physical spray deposition but significantly accelerated grain moisture loss, indicating that its benefit lies in optimizing foliar absorption rather than retention. Regarding monitoring, although both sensors detected senescence, the RGB sensor's correlation degraded after application, refuting the hypothesis that it could replace the multispectral sensor with equal accuracy. It is concluded that the 100 L ha⁻¹ rate combined with the organosilicone adjuvant maximizes the efficacy of desiccation—a process requiring multispectral sensors for accurate monitoring.

Keywords: spray deposition; diquat; NDVI; organosilicone; *Phaseolus vulgaris* L.; RGB; multispectral sensors.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil figura entre os maiores produtores mundiais de feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.), uma leguminosa de grande relevância socioeconômica e nutricional. Na safra 2024/25, a produção nacional atingiu 3,07 milhões de toneladas em uma área plantada de 2,7 milhões de hectares (CONAB, 2025). Globalmente, o feijão desempenha um papel crucial na segurança alimentar, servindo como fonte primária de proteína para milhões de pessoas (FAO, 2022).

A multifatorialidade inerente aos sistemas produtivos do feijoeiro representa um desafio constante para o manejo da cultura, com reflexos diretos na qualidade dos grãos e na produtividade das lavouras. No contexto brasileiro, a cultura é conduzida em três safras anuais, cada uma com particularidades específicas, que impõem desafios que afetam diretamente as etapas finais do ciclo (Aguilar *et al.*, 2025). A colheita, em particular, é uma fase crítica, onde a maturação desuniforme das plantas se torna um desafio tecnológico. O alcance do nível ideal de umidade dos grãos (13–15%) de forma homogênea após a maturidade fisiológica (estádio R9) é frequentemente postergado, resultando em maior tempo de exposição dos grãos a variações climáticas e ao ataque de pragas (Aguilar *et al.*, 2025; Botelho *et al.*, 2023; Marcandalli *et al.*, 2011).

A fim de mitigar o risco associados ao atraso na colheita, a aplicação de herbicidas dessecantes em pré-colheita consolidou-se como uma importante estratégia agrônômica, capaz de promover a uniformização da maturidade da lavoura e acelerar o processo de desfolha e perda de umidade dos grãos (Zanatta *et al.*, 2018). Ademais, a dessecação possibilita maior controle organizacional e aprimora o planejamento logístico da colheita (Vargas *et al.*, 2018).

Para a prática da dessecação em pré-colheita na cultura do feijoeiro, a aplicação do herbicida deve ocorrer após a maturidade fisiológica das plantas (R9), utilizando produtos registrados para esse fim. Atualmente os princípios ativos que possuem registro no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA para ao uso em dessecação em pré-colheita do feijão são o dibrometo de diquat, o glufosinato de amônio e o saflufenacil (BRASIL, 2024).

A eficácia desta prática, no entanto, é intrinsecamente ligada à tecnologia de aplicação. O desafio é particularmente acentuado para herbicidas de contato como o diquat, cuja ação não sistêmica torna a cobertura uniforme da folhagem um pré-requisito indispensável para o sucesso da operação. Visando maior eficiência operacional e redução de custos, observa-se uma tendência de redução das taxas de aplicação, a qual pode comprometer a cobertura da pulverização sobre o alvo (Boller; Machry, 2007; Roman, 2020). Garantir uma deposição eficaz

com taxas de aplicação reduzidas exige uma otimização criteriosa de múltiplos fatores, que interagem de forma complexa para definir o sucesso da aplicação (Cunha, Alves; Marques, 2017; Griesang *et al.*, 2022). Portanto, a definição de um balanço ótimo entre taxa de aplicação e eficácia biológica constitui uma lacuna de conhecimento com impacto direto na produção.

A avaliação da eficácia da dessecação, tradicionalmente depende de notas visuais de desfolha, um método subjetivo e de baixo rendimento, que pode ser superada por ferramentas da agricultura de precisão (Massruhá, 2020; Silveira *et al.*, 2023). O sensoriamento remoto com Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs), surge como uma alternativa de alto rendimento para quantificar a resposta da vegetação, permitindo a análise da performance da dessecação pré-colheita (Andrade *et al.*, 2022; Faqir *et al.*, 2024; Ribeiro; Vitória, 2024; Silveira *et al.*, 2023). Para este fim, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é a métrica padrão (Hott *et al.*, 2019; Szigeti *et al.*, 2024). Contudo, o alto custo dos sensores multiespectrais necessários para capturar a banda do infravermelho próximo (NIR) é um entrave.

Uma alternativa promissora é o uso de sensores RGB de baixo custo, estimando a banda NIR por meio de algoritmos para o cálculo do NDVI, com estudos indicando potencial de alta correlação (Pranaswi *et al.*, 2024; Teixeira *et al.*, 2021; Xunwei *et al.*, 2024), o que demanda validação para a condição específica da dessecação. Os resultados mais recentes da aplicabilidade da estimativa da banda NIR pela metodologia de Arai *et al.* (2016) vem evidenciando a importância da comprovação de eficácia de acordo com as condições inerentes da utilização (Galvêncio; Naue, 2020; Galvêncio *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2024).

A hipótese central deste estudo é que a otimização da dessecação no feijoeiro não é governada pelo aumento linear da deposição de calda, mas sim por um ponto de equilíbrio onde a cobertura do alvo se torna suficiente. Postula-se uma dissociação entre o efeito físico do adjuvante (na deposição) e seu efeito fisiológico (na absorção), onde o principal benefício do organosiliconado reside na aceleração da ação do herbicida, e não apenas no possível aumento da retenção de calda. Como hipótese metodológica, assume-se que a acurácia do monitoramento por sensoriamento remoto dependerá da capacidade do sensor em quantificar o colapso da estrutura celular refletido na banda do NIR, uma sensibilidade que pode ser limitada em sensores RGB com NIR estimado.

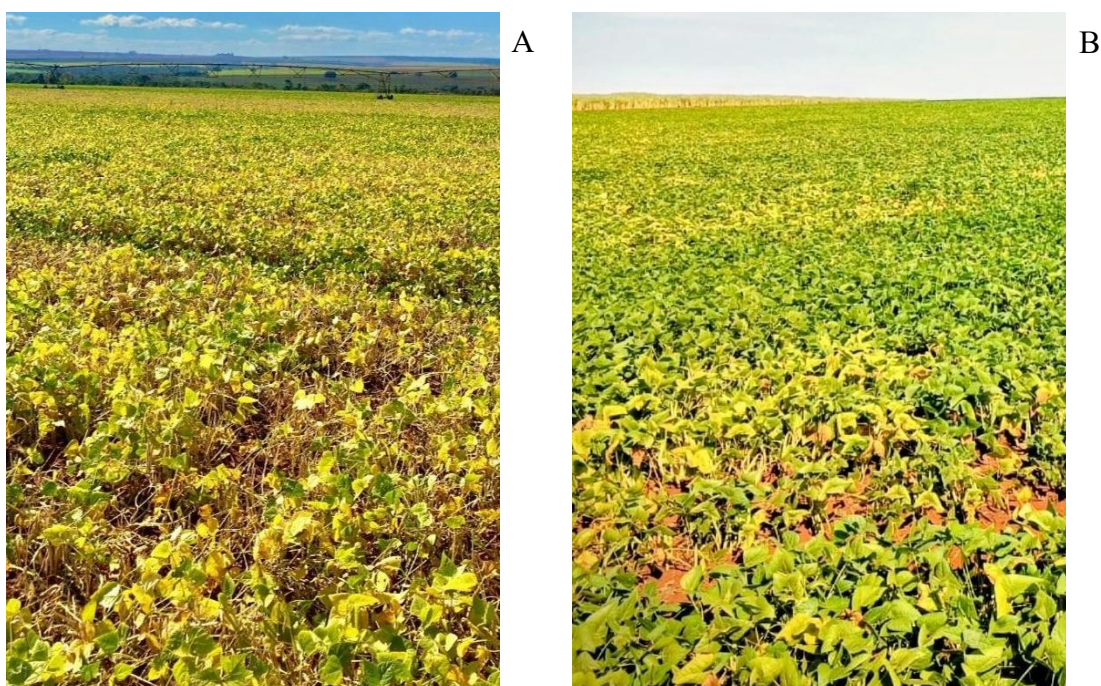
Diante deste exposto, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes taxas de aplicação, com e sem adjuvante, na deposição da pulverização e na eficácia da dessecação pré-colheita do feijoeiro; e comparar a resposta do índice NDVI obtido por sensores RGB e multiespectral no monitoramento dos efeitos da dessecação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Os experimentos foram conduzidos em duplicata, na Fazenda Gaia (Algar Farming), localizada no Município de Monte Alegre de Minas, MG, Brasil (latitude 18° 45' 40.37" S e longitude 48° 45' 31.92" O). De acordo com a classificação de Köppen o clima característico da região é do tipo Aw tropical úmido megatérmico, caracterizado pelo verão quente e úmido e inverno frio e seco. As áreas experimentais, irrigadas por pivô central, apresentavam solo classificado como Latossolo Vermelho Distrófico. O ensaio I (2ª safra) foi semeado em 24 de março de 2023, e o ensaio II (3ª safra) em 26 de junho de 2023. Em ambos, utilizou-se a cultivar TAA DAMA (grupo carioca), de hábito de crescimento indeterminado (tipo III) e ciclo de 85 a 95 dias, semeada com espaçamento de 0,45 m e densidade de 250.000 plantas ha⁻¹. As aplicações dos tratamentos ocorreram no estágio de maturação fisiológica (R9), entre 89 e 91 dias após a semeadura, com as plantas apresentando altura média de 0,30 m e umidade dos grãos de 26% (Ensaio I) e 29% (Ensaio II) (Figuras 1). As análises laboratoriais foram conduzidas no Centro de Excelência em Mecanização Agrícola (CEMA) do Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG), da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Figura 1 - Campos experimentais, cultivar TAA DAMA, ensaio I (A) e ensaio II (B).



Fonte: A autora.

2.2 Delineamento experimental e equipamentos

Os dois ensaios foram instalados em delineamento em blocos casualizados (DBC) com quatro repetições. Os tratamentos foram arrançados em esquema fatorial $2 \times 3 + 1$, totalizando sete tratamentos: o primeiro fator consistiu na ausência ou presença de adjuvante na calda; o segundo fator consistiu em três taxas de aplicação (50, 100 e 150 L ha⁻¹); e um tratamento adicional (controle) correspondente a ausência de aplicação do herbicida. Cada parcela experimental mediu 240 m² (40 x 6 m) com área útil central de 30 m² (10 x 3 m) para as avaliações, sendo o restante considerado como bordadura.

2.3 Produtos e aplicação dos tratamentos

Nas aplicações, foi utilizado o herbicida à base de diquat (OFFER 200 SL®, Yonon, São Paulo, Brasil; 200 g i.a. L⁻¹) na dose de 1,5 L p.c. ha⁻¹ (equivalente a 300 g i.a. ha⁻¹). O diquat é um herbicida de contato, não seletivo, inibidor do Fotossistema I, pertencente ao grupo químico dos bipyridílios. O adjuvante utilizado foi um surfactante não iônico organosiliconado polidimetilsiloxano (Disperse Ultra®, Ubyfol) na concentração 0,04% v/v. De acordo com as informações do fabricante, o adjuvante possui múltiplas funções, incluindo ações físicas (espalhante, adesiva, redutora de deriva) e fisiológicas (penetrante, umectante). Para as avaliações de deposição, foi adicionado à calda o corante alimentício Azul Brilhante (FD&C Blue n.1) como traçador, na dose fixa de 500 g ha⁻¹. A utilização de uma dose fixa do traçador por hectare, em vez de uma concentração fixa na calda, é uma premissa metodológica crucial que permite a comparação direta da massa de produto depositada por unidade de área entre as diferentes taxas de aplicação.

A aplicação dos tratamentos foi realizada com um pulverizador autopropelido (Uniport 2000 Plus, Jacto, Pompeia, Brasil), equipado com barra de pulverização contendo pontas de jato plano com indução de ar (AVI 110025, Jacto S. A.) espaçadas em 0,50 m. A altura da barra foi mantida a 0,50 m acima do dossel da cultura para garantir a correta sobreposição dos jatos. A escolha desta ponta, que produz gotas classificadas como grossas (segundo o fabricante), visa simular uma prática de campo robusta para redução de deriva (Wang *et al.*, 2023). A água utilizada no preparo das caldas foi proveniente de represa artificial, apresentando pH 6 e ausência de material particulado em suspensão. A aplicação dos tratamentos foi realizada no

período da manhã, entre as 9h e as 11h. As diferentes taxas de aplicação foram obtidas pela variação da velocidade de trabalho, mantendo-se a pressão constante em 414 kPa (60 PSI) e, consequentemente, a vazão e o espectro de gotas da ponta (Tabela 1). Esta abordagem isola o efeito da taxa de aplicação, evitando a confusão de variáveis que ocorreria se a pressão ou o tipo de ponta fossem alterados.

Tabela 1 - Parâmetros operacionais utilizados para a aplicação das diferentes taxas de aplicação.

Taxa de aplicação L ha ⁻¹	Velocidade de trabalho (km h ⁻¹)	Vazão da ponta (L min ⁻¹)
50	30,6	1,15
100	15,3	
150	10,2	

Fonte: Elaborada pela autora.

2.4 Condições meteorológicas

As condições meteorológicas foram monitoradas com uma estação meteorológica local (iMetos, Pessl Instruments, Weiz, Áustria), localizada a aproximadamente 3 km da área experimental. Os parâmetros de temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento mantiveram-se dentro da faixa técnica ideal para a aplicação de produtos fitossanitários, assegurando a qualidade da execução (Tabela 2). A direção predominante do vento, para ambos os ensaios, se apresentou perpendicular ao deslocamento do pulverizador.

Tabela 2 - Condições meteorológicas durante a aplicação dos tratamentos nos dois ensaios.

Parâmetro	Ensaio I	Ensaio II
	Intervalo (média)	Intervalo (média)
Temperatura (°C)	22 a 25 (23,5)	24 a 31 (27,5)
Umidade relativa do ar (%)	63 a 66 (65,5)	82 a 75 (78,5)
Velocidade do vento (km h ⁻¹)	3,8 a 2,9 (3,4)	4,7 a 5,7 (5,0)
Direção do vento	NO / SE	SO / NE

Fonte: Elaborada pela autora.

2.5 Avaliações

2.5.1 Deposição foliar

A deposição da calda foi quantificada utilizando o corante Azul Brilhante como traçador. Após a secagem da calda depositada sobre as folhas coletaram-se, ao acaso, três folhas trifolioladas completamente expandidas do terço médio (sendo uma folha de cada planta, em três plantas distintas por parcela), totalizando nove folíolos por amostra composta na área útil. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos identificados e mantidas em recipientes com isolamento térmico e luminoso até o processamento.

No laboratório, a remoção do traçador foi realizada pela adição 30 mL de água deionizada em cada saco plástico, que foram então agitados por 15 minutos a 250 rpm em uma mesa agitadora pendular (TE240/I, Piracicaba, São Paulo, Brasil). A solução resultante foi transferida para copos plásticos e mantida em repouso por 24 horas em refrigerador para decantação de partículas sólidas em suspensão.

A absorvância da calda foi determinada a 630 nm em espectrofotômetro (SP-22, Bioespectro, Curitiba, Paraná, Brasil). Utilizando uma calibração previamente estabelecida, os valores de absorvância foram convertidos em massa do traçador. A área foliar de cada amostra foi mensurada em um medidor de área foliar (LI-3100C, LI-COR, Lincoln, Nebraska, EUA). A deposição foi então calculada relacionando a massa total do traçador recuperada na calda com a área foliar da respectiva amostra (Equação 1).

$$D = \frac{C \times V}{A} \quad (1)$$

Onde:

D: deposição ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$);

C: concentração do traçador na solução ($\mu\text{g mL}^{-1}$);

V: volume de água deionizada usado na lavagem (mL);

A: área foliar total da amostra (cm^2).

2.5.2 Eficácia agronômica

A eficácia agronômica da dessecação pré-colheita foi monitorada diariamente após a aplicação por meio de duas variáveis. O percentual de desfolha foi estimado visualmente por três avaliadores independentes, utilizando uma escala diagramática de notas 0% (sem sintomas) a 100% (desfolha completa), adaptada da escala de Hirano *et al.* (2010) para cultura da soja. A

nota final de cada parcela correspondeu à média das três avaliações. O teor de umidade dos grãos foi determinado em amostras compostas por grãos de 10 plantas coletadas aleatoriamente na área útil, debulhadas manualmente e homogeneizadas. A leitura foi realizada em um medidor de umidade de bancada (G800, São Paulo, São Paulo, Brasil).

2.5.3 Obtenção dos índices NDVI

2.5.3.1 Aquisição e processamento de imagens

As imagens foram adquiridas no dia da aplicação (0 DAA) e nos dias 1, 2 e 3 DAA. Todos os voos ocorreram entre 11:00 e 13:00 h para minimizar os efeitos de sombreamento e da distribuição de refletância bidirecional (Wei e Fang, 2016).

Foram utilizadas duas ARPs: uma DJI Mini 3 Pro, equipada com um sensor RGB (CMOS 1/1.3" 48 MP), e uma DJI Phantom 4 Multispectral, com seis sensores de 1/2,9" (2 MP cada) com bandas espectrais calibradas (Azul (B): 450 ± 16 nm; Verde (G): 560 ± 16 nm; Vermelho (R): 650 ± 16 nm; Extremidade vermelha (RE): 730 ± 16 nm; Infravermelho próximo (NIR): 840 ± 26 nm) e sensor de luz incidente (DLS) integrado para correção da irradiância solar durante o voo. Ambos os voos foram executados a 100 m de altura com 80% de sobreposição lateral e frontal, resultando em resoluções espaciais (GSD) de 0,889 cm (RGB) e 2,083 cm (multiespectral).

O processamento das imagens para a geração dos ortomosaicos foi realizado no software Agisoft Metashape (v. 2.1, São Petersburgo, Rússia), seguindo as etapas: adição e estimativa da qualidade das imagens; definição do sistema SIRGAS 2000 como sistema de coordenadas a ser adotado; alinhamento das fotos em alta acurácia; construção da nuvem densa de pontos em alta qualidade; construção do modelo digital de elevação; e geração do ortomosaico (formato Geotiff).

A identificação das parcelas, etapa de recorte (criação dos polígonos), e posterior obtenção dos índices NDVI foi realizada no software QGIS (v. 3.32.1, Open Source Geospatial Foundation - OSGeo). A identificação das parcelas e suas respectivas áreas úteis foi realizada com base nas coordenadas coletas com um receptor GPS de navegação (Etrex 10, Garmin, Olathe, Kansas, EUA) e corrigidas manualmente com base em pontos fixos de controle ao longo da área, garantindo a precisão do posicionamento das parcelas nos ortomosaicos e a

correspondência espacial entre as avaliações. A delimitação das áreas de úteis de interesse foi realizada pela criação de camadas vetoriais que determinaram seus respectivos polígonos.

2.5.3.2 Cálculo dos índices de vegetação e extração de dados

O cálculo do NDVI foi realizado através do processamento das informações contidas nas bandas espectrais de interesse para geração do índice, sendo utilizado a ferramenta Raster calculator para geração da camada raster contendo em cada pixel o resultado do cálculo.

A obtenção do NDVI dos ortomosaicos gerados pelo sensor multiespectral foi calculado de forma direta utilizando a equação padrão de Rouse *et al.* (1974), (Equação 2).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2)$$

Onde:

NDVI: índice de vegetação por diferença normalizada;

NIR: refletância na banda espectral infravermelho próximo;

RED: refletância na banda espectral do vermelho.

Para geração do NDVI a partir de imagens obtidas com sensor RGB (sem banda NIR dedicada), foi criada uma camada raster com a estimativa da reflectância NIR a partir da banda verde (GREEN). Para tal foi utilizado a equação proposta por Arai *et al.* (2016), que apresenta alta correlação entre reflectância verde e NIR, para testar a viabilidade de uma abordagem de baixo custo (Equação 3).

$$NIRe = \frac{(360,6 - GREEN)}{1,1941} \quad (3)$$

Onde:

NIRe: refletância na banda espectral infravermelho próximo estimado;

GREEN: refletância na banda espectral do verde.

Posteriormente, foi calculado o NDVI obtido pelas imagens do sensor RGB utilizando a mesma ferramenta e a mesma equação utilizada para as imagens do sensor multiespectral.

Os valores relativos aos índices NDVI de cada parcela (área útil) foram extraídos por meio da ferramenta Zonal Statistic, com base na média dos índices obtidos pelos pixels presentes na área delimitada pelos polígonos das camadas vetoriais anteriormente determinadas.

2.6 Análises Estatísticas

Todas as análises estatísticas foram conduzidas no ambiente R, versão 4.3.1 (R Core Team, 2023), utilizando principalmente os pacotes do ecossistema tidyverse para manipulação de dados e ggplot2 para visualização.

Inicialmente, os dados de cada variável foram submetidos à análise de pressuposições do modelo linear. A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, a homogeneidade das variâncias entre os tratamentos pelo teste de Levene, e a aditividade do modelo (ausência de interação bloco vs. tratamento) pelo teste de aditividade de Tukey.

Uma vez atendidas as pressuposições (nos dados originais ou transformados), os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando o efeito dos blocos e dos tratamentos. Para os tratamentos arranjados em esquema fatorial, os efeitos principais e a interação foram avaliados. Quando a interação não foi significativa, o efeito de cada fator foi analisado isoladamente. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, que controla o erro tipo I para todas as comparações par a par. A comparação entre o tratamento adicional (controle) com o fatorial foi realizada com a análise de contraste ($p \leq 0,05$). Para comparar os tratamentos com o controle, utilizou-se o teste de Dunnett ($p \leq 0,05$), que é o procedimento padrão e mais indicado para este tipo de comparação múltipla com um controle comum.

A relação entre as variáveis foi determinada pelo teste de correlação linear de Pearson, que mede a força e a direção da relação linear entre duas variáveis quantitativas, variando de -1 a +1. Adotaram-se os seguintes parâmetros de classificação (Dancey e Reidy, 2006): correlação perfeita ($r = 1$), forte ($r > 0,70$), moderada ($0,6 < r > 0,4$), fraca ($0,4 < r > 0,1$), e ausente ($r = 0$), quando não há dependência linear entre elas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Deposição da calda: efeito da taxa de aplicação e do adjuvante

A análise de variância revelou um efeito significativo da taxa de aplicação sobre a deposição do traçador em ambos os ensaios. Notavelmente, a deposição no terço médio foi sistematicamente maior no ensaio II (3ª safra). Considerando o princípio do balanço de massa, onde uma dose fixa de traçador (500 g ha^{-1}) é distribuída sobre a área foliar, este resultado reflete as diferenças na arquitetura das plantas em cada ciclo de cultivo, sendo tipicamente mais aberta no cultivo de inverno, o que reduziu o efeito guarda-chuva e concentrou a calda nas folhas amostradas. Em relação ao adjuvante organossiliconado, não foi observado efeito principal significativo, tampouco interação entre os fatores (Tabela 3).

Tabela 3 - Deposição de calda no terço médio do feijoeiro submetido a diferentes taxas de aplicação e adição de adjuvante organossiliconado no Ensaio I (2ª safra) e Ensaio II (3ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.

Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	Deposição (µg/cm ²)					
	Ensaio I (2ª Safra)*			Ensaio II (3ª Safra)*		
	C/ adj.	S/ adj.	Média	C/ adj.	S/ adj.	Média
50	0,92	0,80	0,86 B	1,48	1,18	1,33 B
100	1,65	1,61	1,63 A	1,94	1,87	1,90 AB
150	2,18	1,26	1,72 A	2,50	2,27	2,39 A
Média	1,58 a	1,22 a		1,96 a	1,77 a	
CV(%)		38,65			23,95	
SW		0,4331			0,1618	
L		0,2611			0,4249	
T		0,8998			0,7449	

Médias seguidas por letras distintas, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$); * Diferença significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$); SW, L e T representam os valores p para os testes de Shapiro-Wilk (normalidade dos resíduos), Levene (homogeneidade de variâncias) e aditividade de Tukey, respectivamente (valores de $p > 0,05$ indicam atendimento aos pressupostos da ANOVA).

Fonte: A autora.

A resposta da deposição variou em relação ao incremento da taxa de aplicação, revelando dinâmicas físico-químicas complexas na interação gota-folha. No ensaio I, elevar a taxa de 50 para 100 L ha^{-1} resultou em um aumento expressivo de 89,6% na deposição média. No entanto, a elevação subsequente para 150 L ha^{-1} proporcionou um incremento marginal (5,4%), não diferindo estatisticamente. A alta variabilidade ($CV = 38,65\%$) observada no ensaio I é um resultado diagnóstico crucial. Embora não haja diferença estatística, a observação dos

valores absolutos ajuda a elucidar a origem deste alto CV: a 150 L ha⁻¹ sem adjuvante, a deposição média registrada flutuou para 1,26 µg cm⁻² (numericamente inferior à obtida com 100 L ha⁻¹). Esta instabilidade nos dados brutos não configura diferença de tratamentos, mas pode sugerir que o alto volume, associado às gotas grossas, superou o ponto de retenção máxima da folha, possivelmente resultando em coalescência e escorrimento.

Contudo, ao adicionar o adjuvante organosiliconado na taxa de 150 L ha⁻¹, a deposição média registrada foi de 2,18 µg cm⁻² (um incremento numérico de 73,6% em relação à calda sem adjuvante). A variabilidade observada, provavelmente decorrente de escorrimento, impediu a significância estatística desta interação, contudo, o comportamento dos dados sugere um mecanismo físico importante: o organosiliconado pode ter atuado melhorando o espalhamento e a adesão do excesso de volume, atuando como um mitigador do escorrimento. Em contraste, no ensaio II, a arquitetura mais aberta do dossel alterou a dinâmica de penetração. Nesta condição, a taxa de 100 L ha⁻¹ apresentou comportamento estatístico intermediário (letra AB), não diferindo significativamente nem da taxa de 50 L ha⁻¹, nem da taxa de 150 L ha⁻¹. Este padrão evidencia que, em dosséis menos densos, taxas menores conseguem atingir o terço médio com eficácia comparável a medianas ou altas. Ainda assim, a ocorrência de um platô de deposição (Berger-Neto *et al.*, 2017) consolida a taxa de 100 L ha⁻¹ como o ponto de máxima eficácia técnica, entregando cobertura adequada sem o risco iminente de perda para o solo.

A redução de taxas é uma premissa da agricultura moderna, cenário em que os adjuvantes são frequentemente posicionados para otimizar a cobertura (Cunha; Alves; Marques, 2017; Silva *et al.*, 2025; Hilz e Vermeer, 2013). A ausência de incremento estatístico na deposição média pelo uso do adjuvante corrobora Prado *et al.* (2015), que relataram melhorias na eficácia biológica sem aumento na deposição física.

3.2 Eficácia agrônômica da dessecação pré-colheita do feijoeiro

3.2.1. Umidade dos grãos: ação fisiológica do adjuvante

A aplicação do herbicida dessecante promoveu uma aceleração significativa na redução da umidade dos grãos em comparação com a testemunha em ambos os ensaios (Tabelas 4 e 5). Contudo, a dinâmica dessa secagem foi modulada pela interação entre o ambiente, o estado fisiológico da cultura e os princípios termodinâmicos de perda de água. As condições ambientais do período de cultivo de ambos os ensaios interferiram diretamente na taxa de resposta. A análise da testemunha revela que a secagem natural foi quase duas vezes mais rápida no ensaio II (queda de 10,2 pontos de umidade) do que no ensaio I (queda de 5,5 pontos). Este

comportamento é explicado não apenas por um estágio de senescência natural possivelmente mais avançado, mas principalmente pelo maior teor de umidade inicial dos grãos no ensaio II (26,9% contra 23,4% do ensaio I). Fisicamente, um maior gradiente de umidade entre o grão e a atmosfera impulsiona uma taxa de difusão de água mais acelerada nas fases iniciais da secagem, taxa esta que desacelera à medida que o grão se aproxima do seu ponto de equilíbrio higroscópico (Taiz *et al.*, 2017).

Tabela 4 - Teor de umidade dos grãos de feijoeiro submetido a diferentes taxas de aplicação e adição de adjuvante organossiliconado no Ensaio I (2ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.

Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	Teor de umidade dos grãos (%)					
	1º DAA			2º DAA*		
	C/ adj.	S/ adj.	Média	C/ adj.	S/ adj.	Média
50	17,2	20,7	19,0	13,2 [□]	14,7 [□]	14,0
100	16,6	17,4	17,0	13,3 [□]	13,9 [□]	13,6
150	18,1	21	19,5	13,2 [□]	14,3 [□]	13,8
Média	17,3	19,7		13,2	14,3	
Média do fatorial		18,6			13,8 A	
Controle		23,4			20,9 B	
CV(%)		26,77			12,48	
SW		0,1153			0,3927	
L		0,1823			0,3849	
T		0,8125			0,4634	
Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	3º DAA*					
	C/ adj.	S/ adj.	Média			
50	11,9 [□]	12,1 [□]	12,0 B			
100	9,7 [□]	11,1 [□]	10,4 A			
150	10,7 [□]	12,2 [□]	11,5 AB			
Média	10,8 a	11,8 b				
Média do fatorial		11,3 A				
Controle		17,9 B				
CV(%)		7,81				
SW		0,4872				
L		0,9553				
T		0,7663				

Médias seguidas por letras distintas, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey entre os tratamentos que compõem o fatorial e pela análise de contraste entre o tratamento adicional com o fatorial ($p \leq 0,05$); * Diferença significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$); [□] Médias que diferem do controle pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$); SW, L e T representam os valores p para os testes de Shapiro-Wilk (normalidade dos resíduos), Levene (homogeneidade de variâncias) e aditividade de Tukey, respectivamente (valores de $p > 0,05$ indicam atendimento aos pressupostos da ANOVA).

Fonte: A autora.

Tabela 5 - Teor de umidade dos grãos de feijoeiro submetido a diferentes taxas de aplicação e adição de adjuvante organosiliconado no Ensaio II (3ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.

Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	Teor de umidade dos grãos (%)					
	1º DAA			2º DAA		
	C/ adj.	S/ adj.	Média	C/ adj.	S/ adj.	Média
50	26,5	27,2	26,9	20,1	20,7	20,4
100	26,2	24,3	25,3	22,6	20,5	21,5
150	24,3	25,9	25,1	20,6	20,4	20,5
Média	25,7	25,8		21,1	20,5	
Média do fatorial		25,7			20,8	
Controle		26,9			24,0	
CV(%)		12,47			14,00	
SW		0,1383			0,1145	
L		0,5432			0,1255	
T		0,8123			0,1714	
Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	3º DAA*					
	C/ adj.	S/ adj.	Média			
	C/ adj.	S/ adj.	Média			
50	14,6 [□]	14,5 [□]	14,6			
100	14,5 [□]	14,8	14,7			
150	13,6 [□]	14,5 [□]	14,1			
Média	14,2	14,6				
Média do fatorial		14,4 A				
Controle		16,7 B				
CV(%)		7,53				
SW		0,8634				
L		0,06523				
T		0,2266				

Médias seguidas por letras distintas, na coluna, diferem entre si pela análise de contraste entre o tratamento adicional com o fatorial ($p \leq 0,05$); * Diferença significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$); [□] Médias que diferem do controle pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$); SW, L e T representam os valores p para os testes de Shapiro-Wilk (normalidade dos resíduos), Levene (homogeneidade de variâncias) e aditividade de Tukey, respectivamente (valores de $p > 0,05$ indicam atendimento aos pressupostos da ANOVA).

Fonte: A autora.

A influência do ambiente sobre a secagem induzida foi principalmente dominante no ensaio II. No ensaio I (ambiente mais seco), o teor de umidade ideal para a colheita (13-15%) e a diferenciação estatística em relação à testemunha foram atingidos rapidamente, aos 2 Dias Após a Aplicação (DAA). No ensaio II, a alta umidade relativa do ar reduziu o Déficit de Pressão de Vapor (DPV) da atmosfera, atuando como um retardante termodinâmico. Consequentemente, a análise estatística revela que o herbicida necessitou de 72 horas (3 DAA) para superar a taxa de secagem natural da testemunha. Este atraso operacional de 24 horas na resposta química destaca que a força motriz para a perda de água depende intrinsecamente do gradiente de potencial hídrico entre a planta e o ar circundante (Taiz *et al.*, 2017).

Aos 3º DAA do Ensaio I, a máxima diferenciação entre os tratamentos torna-se estatisticamente evidente. A robustez desta análise é comprovada pela dinâmica do Coeficiente de Variação (CV%), que reduziu de 26,77% (1º DAA) para 7,80% (3º DAA), indicando que a eficácia do herbicida suprimiu a variabilidade biológica inicial e homogeneizou a resposta da cultura. Neste ponto, a resposta biológica refletiu perfeitamente os dados físicos de deposição: o tratamento com 100 L ha⁻¹ resultou em uma umidade significativamente menor (10,4%) que o tratamento com 50 L ha⁻¹ (12,0%), e foi estatisticamente igual ao de 150 L ha⁻¹ (11,5%). Isso comprova que a massa de ingrediente ativo depositada com 100 L ha⁻¹ foi suficiente para maximizar a velocidade de dessecação, e que o acréscimo de taxa para 150 L ha⁻¹ não foi convertido em benefício agrônomo.

Além da velocidade de secagem, a análise dos dados revela um benefício de uniformidade proporcionado pelo adjuvante. Aos 2 DAA do ensaio I, os tratamentos que receberam o organosiliconado atingiram teores de umidade idênticos (13,2%, 13,3% e 13,2%) nas taxas de 50, 100 e 150 L ha⁻¹, respectivamente. Em contraste, as parcelas sem adjuvante apresentaram maior flutuação (13,9% a 14,7%). Este comportamento indica que a ação fisiológica do adjuvante atua como um "tampão", mitigando as falhas de cobertura inerentes as diferentes taxas de aplicação e garantindo uma secagem uniforme em toda a área, um fator crítico para a qualidade da colheita mecanizada.

O resultado mais contundente para a hipótese central do estudo ocorreu também aos 3 DAA do ensaio I: a manifestação do efeito principal do adjuvante. Os tratamentos com adjuvante apresentaram uma média de umidade de 10,8%, significativamente inferior aos 11,8% dos tratamentos sem adjuvante (Tabela 4). Como demonstrado, o adjuvante não aumentou a deposição física da calda, portanto, esta aceleração na secagem é a evidência da dissociação de efeitos. Conforme descrito por Xu *et al.* (2024), adjuvantes surfactantes modificam a capacidade de aderência e a permeabilidade da cutícula foliar. Reitera-se que o organosiliconado otimizou a absorção do diquat, acelerando o colapso das membranas celulares e, consequentemente, a perda de água (efeito fisiológico).

A ausência de efeito do adjuvante no ensaio II corrobora esta tese por uma via termodinâmica. Neste cenário, o fator limitante para a secagem não era a taxa de absorção do herbicida na folha, mas sim baixa demanda evaporativa da atmosfera (baixo DPV). O benefício fisiológico proporcionado pelo adjuvante foi mascarado pelo retardante ambiental. Este comportamento define com precisão o posicionamento técnico desta tecnologia: adjuvantes penetrantes agregam valor máximo à dessecação em ambientes onde a rápida absorção do

ingrediente ativo é o principal gargalo, mas não podem compensar a incapacidade termodinâmica da atmosfera em extrair a água da planta.

3.2.2 Percentual de desfolha: um indicador visual

A desfolha visual atuou como um indicador rápido da fitotoxicidade do herbicida, com todos os tratamentos superando a testemunha e atingindo níveis superiores a 90% aos três DAA, em ambos os ensaios. A análise da precisão experimental revela um comportamento biométrico notável: em ambos os ensaios, o Coeficiente de Variação (CV%) diminuiu drasticamente ao longo do tempo (de 14,05% para 4,72% no Ensaio I; e de 7,42% para 3,79% no Ensaio II). Esta redução da variância indica que a potência da intervenção química suprimiu a variabilidade biológica inicial da cultura, conferindo alta confiabilidade aos resultados da avaliação final (Tabela 6 e 7).

Tabela 6 - Percentual de desfolha do feijoeiro submetido a diferentes taxas de aplicação e adição de adjuvante organosiliconado no Ensaio I (2ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.

Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	Percentual de desfolha (%)					
	1º DAA			2º DAA*		
	C/ adj.	S/ adj.	Média	C/ adj.	S/ adj.	Média
50	67,5	61,3	64,4	81,3 [□]	73,8	77,6
100	58,8	61,3	60,1	81,3 [□]	78,8 [□]	80,1
150	65,0	63,8	64,4	80,0 [□]	80,0 [□]	80,0
Média	63,8	62,1		80,9	77,5	
Média do fatorial		62,9			79,2 A	
Controle		58,8			63,8 B	
CV(%)		14,05			7,84	
SW		0,2525			0,9744	
L		0,0621			0,7047	
T		0,1780			0,8965	
Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	3º DAA*					
	C/ adj.	S/ adj.	Média			
50	91,8 [□]	88,8 [□]	90,3			
100	95,0 [□]	92,5 [□]	93,8			
150	92,5 [□]	94,3 [□]	93,4			
Média	93,1	91,9				
Média do fatorial		92,5 A				
Controle		74,3 B				
CV(%)		4,72				
SW		0,5701				

L	0,4510
T	0,4856

Médias seguidas por letras distintas, na coluna, diferem entre si pela análise de contraste entre o tratamento adicional com o fatorial ($p \leq 0,05$); * Diferença significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$); $\square$ Médias que diferem do controle pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$); SW, L e T representam os valores p para os testes de Shapiro-Wilk (normalidade dos resíduos), Levene (homogeneidade de variâncias) e aditividade de Tukey, respectivamente (valores de $p > 0,05$ indicam atendimento aos pressupostos da ANOVA).

Fonte: A autora.

Tabela 7 - Percentual de desfolha do feijoeiro submetido a diferentes taxas de aplicação e adição de adjuvante organosiliconado no Ensaio II (3ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.

Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	Percentual de desfolha (%)					
	1º DAA*			2º DAA*		
	C/ adj.	S/ adj.	Média	C/ adj.	S/ adj.	Média
50	57,5	62,5	60,0	85,0 $\square$	81,3 $\square$	83,2 B
100	60,0	56,3	58,2	86,3 $\square$	82,5 $\square$	84,4 B
150	65,0 $\square$	65,0 $\square$	65,0	90,0 $\square$	90,0 $\square$	90,0 A
Média	60,8	61,3		87,1	84,6	
Média do fatorial		61,0 A			85,8 A	
Controle		55,0 B			63,8 B	
CV(%)		7,42			5,0	
SW		0,6042			0,5368	
L		0,0613			0,0986	
T		0,3433			0,8998	
Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	3º DAA*					
	C/ adj.	S/ adj.	Média			
	C/ adj.	S/ adj.	Média			
50	95,0 $\square$	93,0 $\square$	94,0			
100	97,5 $\square$	96,0 $\square$	96,8			
150	98,5 $\square$	98,5 $\square$	98,5			
Média	97,0	95,8				
Média do fatorial		96,4 A				
Controle		69,8 B				
CV(%)		3,79				
SW		0,5685				
L		0,0564				
T		0,6611				

Médias seguidas por letras distintas, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey entre os tratamentos que compõem o fatorial e pela análise de contraste entre o tratamento adicional com o fatorial ($p \leq 0,05$); * Diferença significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$); $\square$ Médias que diferem do controle pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$); SW, L e T representam os valores p para os testes de Shapiro-Wilk (normalidade dos resíduos), Levene (homogeneidade de variâncias) e aditividade de Tukey, respectivamente (valores de $p > 0,05$ indicam atendimento aos pressupostos da ANOVA).

Fonte: A autora.

A análise detalhada revela que o efeito da taxa de aplicação na desfolha foi transitório, porém de ação imediata em condições de dossel denso. No Ensaio II, a taxa de 150 L ha⁻¹ foi o único tratamento a diferir estatisticamente da testemunha logo no 1º DAA. Essa superioridade inicial consolidou-se no 2º DAA, onde a taxa de aplicação de 150 L ha⁻¹ (90,0%) superou as taxas de 50 e 100 L ha⁻¹, respectivamente. Este efeito inicial reflete a necessidade de uma taxa

maior para transpor a barreira física de um dossel mais úmido e fechado, atingindo o limiar crítico de cobertura mais cedo. Contudo, devido ao mecanismo de ação do diquat, a peroxidação lipídica ocorre em cadeia, culminando em necrose rápida e generalizada (Roman *et al.*, 2007). Esta agressividade permitiu que os tratamentos de menor taxa alcançassem o mesmo teto de eficácia visual na avaliação subsequente (3 DAA), suprimindo as diferenças estatísticas.

Em contraste com os resultados de umidade dos grãos, observa-se a ausência de efeito da adição do adjuvante sobre o percentual de desfolha em qualquer uma das avaliações. Este resultado consolida definitivamente a tese da dissociação de efeitos e encontra respaldo na morfologia da planta. As folhas do feijoeiro, possuindo cutícula mais delgada e ampla área de interceptação, atingem rapidamente o teto de resposta necrótica apenas com a formulação original do herbicida; neste tecido, o poder penetrante do adjuvante torna-se redundante. Em contrapartida, as vagens e hastes, estruturas que governam a umidade do grão, apresentam barreiras morfológicas mais espessas. É exatamente na transposição destas barreiras mais difíceis que a ação fisiológica do organosiliconado se manifesta, explicando por que o adjuvante acelerou a secagem do grão sem alterar a velocidade de queda das folhas.

A rápida ação dessecante do diquat, que explica a homogeneização dos tratamentos ao longo do tempo, deve-se ao seu mecanismo como inibidor do Fotossistema I. A molécula desvia elétrons da cadeia transportadora, gerando espécies reativas de oxigênio (radicais livres) que causam o rompimento das membranas celulares em um processo destrutivo e irreversível (Roman *et al.*, 2007).

Finalmente, é essencial reforçar que a eficácia do processo de dessecação pré-colheita não deve ser guiada apenas pelo percentual de desfolha. Embora um indicador visual prático para o monitoramento a campo, o parâmetro que realmente determina o momento adequado e seguro para a operação de colheita é o teor de umidade dos grãos. A eficácia e a segurança do uso do diquat na dessecação pré-colheita do feijoeiro, garantindo a uniformidade sem afetar negativamente a produtividade ou a qualidade dos grãos, são corroboradas por um robusto corpo de literatura nacional (Coêlho *et al.*, 2024; Donato *et al.*, 2022; Rosado *et al.*, 2019; Simionatto *et al.*, 2021).

3.3 Monitoramento da dessecação por sensoriamento remoto

A aplicação do herbicida induziu uma queda abrupta e significativa nos valores de NDVI em todos os tratamentos em comparação com a testemunha, em ambos os ensaios e com ambos os sensores (Tabelas 8, 9 e 10). Este resultado confirma que o NDVI é uma métrica

sensível para detectar a ocorrência de injúria e o avanço da senescência induzida, corroborando trabalhos que demonstram sua eficácia para essa finalidade (Costa *et al.*, 2020; Jorge *et al.*, 2019; Ganascini *et al.*, 2019) e para constatar danos por deriva (Abrantes *et al.*, 2021; Basílio *et al.*, 2024). Contudo, o ponto mais importante desta seção é a incapacidade de ambos os sensores em detectar diferenças estatísticas entre as taxas de aplicação ou o efeito do adjuvante nos tratamentos dessecados.

Tabela 8 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), estimado por sensor RGB, em dossel de feijoeiro submetido a diferentes taxas de aplicação e adição de adjuvante no Ensaio I (2ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.

Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	NDVI – sensor RGB com banda NIR obtida por cálculo matemático					
	Dia da aplicação			1º DAA*		
	C/ adj.	S/ adj.	Média	C/ adj.	S/ adj.	Média
50	0,2119	0,2165	0,2142	0,1774 [□]	0,1701 [□]	0,1738
100	0,2128	0,1977	0,2053	0,1752 [□]	0,1664 [□]	0,1708
150	0,2104	0,1999	0,2052	0,1616 [□]	0,1593 [□]	0,1605
Média	0,2117	0,2047		0,1714	0,1653	
Média do fatorial		0,2082			0,1683 A	
Controle		0,2332			0,2354 B	
CV(%)		10,87			9,68	
SW		0,6931			0,3258	
L		0,5766			0,7968	
T		0,4601			0,2157	
Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	2º DAA*			3º DAA*		
	C/ adj.	S/ adj.	Média	C/ adj.	S/ adj.	Média
	C/ adj.	S/ adj.	Média	C/ adj.	S/ adj.	Média
50	0,1476 [□]	0,1480 [□]	0,1478	0,1265 [□]	0,1300 [□]	0,1282
100	0,1389 [□]	0,1422 [□]	0,1406	0,1180 [□]	0,1130 [□]	0,1155
150	0,1291 [□]	0,1395 [□]	0,1343	0,0983 [□]	0,1194 [□]	0,1086
Média	0,1385	0,1432		0,1143	0,1208	
Média do fatorial		0,1409 A			0,1175 A	
Controle		0,1979 B			0,1717 B	
CV(%)		11,79			14,43	
SW		0,7804			0,8602	
L		0,2768			0,3906	
T		0,6442			0,3465	

Médias seguidas por letras distintas, na coluna, diferem entre si pela análise de contraste entre o tratamento adicional e a média das combinações do fatorial ($p \leq 0,05$); * Diferença significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$); [□] Médias que diferem do controle pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$). SW, L e T representam os valores p para os testes de Shapiro-Wilk (normalidade dos resíduos), Levene (homogeneidade de variâncias) e aditividade de Tukey, respectivamente (valores de $p > 0,05$ indicam atendimento aos pressupostos da ANOVA).

Fonte: A autora.

Tabela 9 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), estimado por sensor RGB, em dossel de feijoeiro submetido a diferentes taxas de aplicação e adição de adjuvante no Ensaio II (3ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.

Taxa de Aplicação	NDVI – sensor RGB com banda NIR obtida por cálculo matemático
-------------------	---

(L ha ⁻¹)	Dia da aplicação ^{ns}			1º DAA*		
	C/ adj.	S/ adj.	Média	C/ adj.	S/ adj.	Média
50	0,1317	0,1361	0,1339	0,0360 [□]	0,0368 [□]	0,0364
100	0,1275	0,1410	0,1343	0,0463 [□]	0,0557 [□]	0,0510
150	0,0931	0,1102	0,1017	0,0101 [□]	0,0197 [□]	0,0149
Média	0,1174	0,1291		0,0308	0,0374	
Média do fatorial		0,1233			0,0341 A	
Controle		0,1597			0,1387 B	
CV(%)		39,45			92,36	
SW		0,3237			0,3559	
L		0,0496			0,4257	
T		0,4772			0,7136	
Taxa de Aplicação	2º DAA*			3º DAA*		
(L ha ⁻¹)	C/ adj.	S/ adj.	Média	C/ adj.	S/ adj.	Média
50	0,0530 [□]	0,0496 [□]	0,0513	0,0530 [□]	0,0759 [□]	0,0645
100	0,0580 [□]	0,0497 [□]	0,0539	0,0698 [□]	0,0617 [□]	0,0658
150	0,0376 [□]	0,0577 [□]	0,0477	0,0578 [□]	0,0636 [□]	0,0607
Média	0,0495	0,0523		0,0602	0,0671	
Média do fatorial		0,0509 A			0,0636 A	
Controle		0,1397 B			0,1115 B	
CV(%)		45,62			46,62	
SW		0,0499			0,0609	
L		0,3126			0,5265	
T		0,4855			0,5569	

Médias seguidas por letras distintas, na coluna, diferem entre si pela análise de contraste entre o tratamento adicional e a média das combinações do fatorial ($p \leq 0,05$); * Diferença significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$); [□] Médias que diferem do controle pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$). SW, L e T representam os valores p para os testes de Shapiro-Wilk (normalidade dos resíduos), Levene (homogeneidade de variâncias) e aditividade de Tukey, respectivamente (valores de $p > 0,05$ indicam atendimento aos pressupostos da ANOVA).

Fonte: A autora.

Tabela 10 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), obtido por sensor multiespectral, em dossel de feijoeiro submetido a diferentes taxas de aplicação e adição de adjuvante no Ensaio II (3ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.

Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	NDVI – sensor multiespectral					
	Dia da aplicação			1º DAA*		
	C/ adj.	S/ adj.	Média	C/ adj.	S/ adj.	Média
50	0,1641	0,1210	0,1426	0,0910	0,0691	0,0801
100	0,1199	0,1159	0,1179	0,0810	0,0685	0,0748
150	0,0992	0,0328	0,0660	0,0812	0,0215 [□]	0,0514
Média	0,1277	0,0899		0,0844	0,0530	
Média do fatorial		0,1029			0,0687 A	
Controle		0,1490			0,1390 B	
CV(%)		83,31			59,03	
SW		0,6720			0,4244	
L		0,0949			0,2924	
T		0,4296			0,7935	
Tratamentos	2º DAA*			3º DAA*		
	C/ adj.	S/ adj.	Média	C/ adj.	S/ adj.	Média
50 L ha ⁻¹	-0,0654 [□]	-0,0934 [□]	-0,0794	-0,0491 [□]	-0,0567 [□]	-0,0529
100 L ha ⁻¹	-0,0748 [□]	-0,1135 [□]	-0,0942	-0,0548 [□]	-0,0856 [□]	-0,0702

150 L ha ⁻¹	-0,0481 [□]	-0,1362 [□]	-0,0922	-0,0474 [□]	-0,0941 [□]	-0,0708
Média	-0,0628	-0,1144		-0,0505	-0,0788	
Média do fatorial		-0,0886 A			-0,0646 A	
Controle		0,0504 B			0,0322 B	
CV(%)		71,99			77,69	
SW		0,5431			0,0891	
L		0,2744			0,2508	
T		0,8049			0,8862	

Médias seguidas por letras distintas, na coluna, diferem entre si pela análise de contraste entre o tratamento adicional e a média das combinações do fatorial ($p \leq 0,05$); * Diferença significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$); [□] Médias que diferem do controle pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$). SW, L e T representam os valores p para os testes de Shapiro-Wilk (normalidade dos resíduos), Levene (homogeneidade de variâncias) e aditividade de Tukey, respectivamente (valores de $p > 0,05$ indicam atendimento aos pressupostos da ANOVA).

Fonte: A autora.

A análise aprofundada revela que a limitação em diferenciar os tratamentos está ligada a um efeito de saturação do sinal, cuja dinâmica foi fortemente modulada pela arquitetura do dossel e pela heterogeneidade espacial. A qualidade experimental da leitura dos sensores variou entre as safras. O Ensaio I apresentou alta precisão (CVs < 15%), enquanto o Ensaio II sofreu com extrema variabilidade (CVs de 39% a 92%). Esta explosão do Coeficiente de Variação no Ensaio II é explicada pela arquitetura da cultura, conforme discutido na avaliação de deposição, o dossel de inverno era mais aberto (menor IAF); e pelas condições ambientais nos momentos de coleta das imagens, uma vez que o período de análise representa o início do período chuvoso na região, acentuando possíveis interferências da temperatura e umidade do ar e do solo nos dados coletados. Os pixels capturados pelo drone representavam uma mistura de tecido vegetal e solo nu, gerando um ruído espectral que inviabilizou a diferenciação estatística dos tratamentos. Devido às características da cultura no Ensaio II, foi possível observar uma ação extremamente rápida do herbicida. Diferenças entre as médias dos tratamentos e do controle foram detectadas logo no dia da aplicação. As imagens capturadas imediatamente após a pulverização já evidenciavam o início do processo fisiológico que culminou na completa dessecação das plantas nos dias subsequentes.

Dentro deste contexto de saturação e ruído, a divergência fundamental entre os sensores manifestou-se na magnitude da leitura sob estresse severo. O sensor multispectral demonstrou sensibilidade superior e coerência biofísica, registrando valores médios negativos de -0,088 aos 2 DAA e -0,064 aos 3 DAA nos tratamentos com herbicida (Tabela 10). Embora o NDVI para vegetação saudável varie tipicamente de 0,2 a 1,0 (Wang *et al.*, 2024), a ação do diquat causa o colapso do mesófilo, reduzindo a reflectância do infravermelho próximo (NIR) e levando o índice para o campo negativo, indicando ausência total de vigor (Rouse *et al.*, 1973; Wang *et al.*, 2024).

Em contraste, a análise da Tabela 9 revela uma anomalia metodológica relevante do sensor RGB. Após a queda inicial no 1º DAA, os valores de NDVI estimados pelo RGB apresentaram um falso incremento aos 2 DAA e 3 DAA. Biologicamente, é impossível que o vigor aumente durante a dessecação. Este comportamento anômalo ocorreu porque, à medida que a desfolha avançou (atingindo 96% aos 3 DAA), o sensor passou a capturar predominantemente o solo nu. A equação de Arai *et al.* (2016), que estima o NIR baseando-se na luz visível, atribui ao solo um valor de NDVI levemente superior ao de uma folha completamente necrosada. O sensor RGB foi, portanto, "enganado" pelo fundo da imagem, criando um piso artificial positivo. Tais resultados atestam, de igual modo, a importância do sensor de luz incidente (DLS) integrado ao equipamento para correção da irradiância solar durante o voo. A falta de tais correções pode ter acentuado as discrepâncias entre os métodos de obtenção de NDVI utilizados.

Apesar desta limitação quantitativa ao longo do tempo, a análise do teste de Dunnett revela um comportamento operacional do sensor RGB na detecção precoce do estresse. No Ensaio II, caracterizado por alta heterogeneidade, o sensor RGB foi capaz de diferenciar estatisticamente todos os tratamentos químicos em relação à testemunha logo no 1º DAA (Tabela 9). Em contrapartida, o sensor multiespectral, prejudicado pelo alto ruído do dossel aberto (CV = 83,31%), falhou em isolar a maioria dos tratamentos da testemunha neste mesmo período (Tabela 10). Este comportamento indica que o índice estimado por RGB, por ser altamente sensível à degradação inicial dos pigmentos visíveis, atua como uma ferramenta binária de resposta ultrarrápida (24 horas), superior ao multiespectral na constatação imediata do choque químico nessas condições de campo.

É imperativo ressaltar, contudo, que a limitação do sensor RGB ocorreu sob a condição de estresse químico agudo e desfolha severa. A análise do tratamento controle na tabela 8 (dossel fechado) revela que o NDVI estimado pelo sensor RGB rastreou com precisão a senescência natural da cultura, registrando uma queda gradual e consistente de 0,2354 (1º DAA) para 0,1717 (3º DAA). Isso demonstra que a metodologia de estimativa da banda NIR possui sensibilidade adequada para o monitoramento de processos fisiológicos lentos, falhando apenas quando a relação matemática entre as bandas visíveis é rompida pela destruição celular abrupta ou pela exposição do solo.

Esta falha do sensor RGB em mimetizar o comportamento do sensor multiespectral em condições de estresse severo será quantificada e validada na análise de correlação a seguir, que testará formalmente a hipótese metodológica deste estudo.

3.4 Análise de correlação e validação quantitativa das hipóteses

A análise de correlação de Pearson foi conduzida para quantificar a relação entre as variáveis agronômicas (umidade dos grãos e desfolha) e os dados de sensoriamento remoto (Tabelas 11 e 12), a fim de validar as hipóteses do estudo. A discussão é apresentada em duas frentes: a avaliação do NDVI como um substituto para as medições agronômicas, que testa a hipótese da dissociação de efeitos, e a validação cruzada da metodologia de estimação do NIR, que testa a hipótese metodológica.

Tabela 11 - Coeficientes de correlação de Pearson entre umidade dos grãos, percentual de desfolha e NDVI (estimado por sensor RGB) no Ensaio I (2ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.

	DESF ¹	NDVI ¹	DESF ²	NDVI ²	DESF ³	NDVI ³
UMIG ¹	-0,18	-0,08				
DESF ¹		0,00				
UMIG ²			-0,58	0,22		
DESF ²				-0,20		
UMIG ³					-0,56	0,12
DESF ³						-0,08

UMIG: umidade dos grãos; DESF: desfolha; NDVI: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; ¹ análise realizada no primeiro DAA; ² análise realizada no segundo DAA; e ³ análise realizada no terceiro DAA.

Fonte: A autora.

Tabela 12 - Coeficientes de correlação de Pearson entre umidade dos grãos, percentual de desfolha e NDVI (obtidos por sensores RGB e multiespectral) no Ensaio II (3ª safra). Monte Alegre de Minas – MG, 2023.

	NDVI ^{0*}	DESF ¹	NDVI ¹	NDVI ^{1*}	DESF ²	NDVI ²	NDVI ^{2*}	DESF ³	NDVI ³	NDVI ^{3*}
NDVI ⁰	0,81									
UMIG ¹		-0,21	0,37	0,35						
DESF ¹			-0,23	-0,46						
NDVI ¹				0,52						
UMIG ²					-0,25	0,38	0,23			
DESF ²						-0,52	-0,03			
NDVI ²							0,23			
UMIG ³								-0,33	0,36	-0,09
DESF ³									-0,53	-0,12
NDVI ³										0,09

UMIG: umidade dos grãos; DESF: desfolha; NDVI: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; * NDVI obtido por sensor multiespectral; ⁰ análise realizada antes da aplicação; ¹ análise realizada no primeiro DAA; ² análise realizada no segundo DAA; e ³ análise realizada no terceiro DAA; em negrito os coeficientes de correlação entre os índices NDVI obtidos pelos sensores RGB e multiespectral.

Fonte: A autora.

3.4.1 O NDVI e a dissociação de efeitos

Antes de avaliar a relação com os sensores, é crucial analisar a correlação entre as próprias variáveis agrônomicas, que revela o efeito do ambiente na dinâmica da dessecação pré-colheita. No Ensaio I (Tabela 11), conduzido em condições mais secas, a correlação entre a umidade dos grãos e a desfolha foi moderada ($r = -0,58$ aos 2 DAA). Em contraste, no Ensaio II (Tabela 12), em ambiente mais úmido, essa correlação foi consistentemente fraca ($r < -0,33$). Isso indica que, no ambiente mais seco, a queda das folhas e a perda de água dos grãos foram processos mais sincronizados. No ambiente úmido, a alta umidade relativa do ar atuou como um "freio" na secagem dos grãos, dessincronizando os dois processos.

Com este cenário agrônômico estabelecido, a análise da correlação com os sensores revela uma limitação ainda mais profunda. A correlação entre os índices NDVI (de ambos os sensores) e a umidade dos grãos foi consistentemente fraca, não ultrapassando $r = 0,38$. Está fraca correlação é a prova matemática da hipótese de dissociação de efeitos. Nas seções anteriores, demonstrou-se que o adjuvante teve um efeito fisiológico significativo, acelerando a perda de umidade dos grãos. O fato de o NDVI, um índice baseado em reflectância do dossel superior, não se correlacionar com essa variável, prova que ele foi menos preciso para a ação mais sutil e interna do adjuvante na vagem. Isso reforça que, para esta aplicação, o sensoriamento remoto foi uma ferramenta qualitativa de detecção de estresse foliar, mas falhou em substituir a precisão da avaliação agrônômica direta para quantificar a eficácia de tratamentos que atuam em nível fisiológico.

3.4.2 A dinâmica para o método de estimação do NIR

O teste conclusivo da hipótese metodológica reside na validação cruzada entre os sensores. A análise revelou uma correlação muito forte e positiva ($r = 0,81$) no dia da aplicação, indicando os sensores concordavam em áreas de vegetação mais saudável. Contudo, esta relação se desfez após a aplicação do herbicida.

A análise da dinâmica temporal da correlação com a desfolha (Tabela 12) expõe a falha de forma inequívoca: a correlação do NDVI-RGB com a desfolha aumentou em magnitude com o tempo (de $r = -0,23$ para $r = -0,53$). Em contraste, a correlação do NDVI-Multiespectral com a desfolha desintegrou-se completamente (de $r = -0,46$ para $r = -0,03$).

Esta dinâmica oposta é a prova de que o sensor de baixo custo deixou de ser um substituto confiável para o sensor de alta precisão sob estresse agudo. A explicação reside na natureza da saturação do sinal: o sensor multispectral, por capturar a banda NIR real, foi capaz de registrar a queda drástica da reflectância e atingir valores negativos, saturando rapidamente

em um ponto mínimo que representa a morte celular. Por já estar saturado, ele parou de acompanhar a progressão visual da queda das folhas. O sensor RGB, limitado por sua estimativa (Arai *et al.*, 2016), não conseguiu replicar essa dinâmica. Conforme a desfolha avançou e o solo ficou exposto, o RGB passou a ler o fundo da imagem, criando uma correlação espúria com a desfolha e saturando em um ponto mais elevado, próximo de zero. As diferentes respostas espectrais também podem ser um reflexo das especificações técnicas dos sensores, como afirmam Stow *et al.* (2019).

Diante da perda de correlação, descarta-se a possibilidade de utilização do sensor RGB de baixo custo (com NIR estimado via Arai *et al.*, 2016) em substituição ao sensor multiespectral para o monitoramento quantitativo da curva de senescência proporcionada por herbicida. Embora o emprego de RPAs seja uma abordagem eficaz para o monitoramento agrícola (Wang *et al.*, 2024; Janoušek *et al.*, 2023; Avgoustaki *et al.*, 2022), a escolha do sensor deve ser criteriosa. Para estudos que exijam alta fidelidade na captura da dinâmica da senescência, o sensor multiespectral é a ferramenta recomendada. A superação das limitações do sensor RGB para fins científicos exigiria abordagens mais sofisticadas, como calibrações radiométricas (Galvinctio; Naue, 2020), modelos de aprendizado profundo (Yuan *et al.*, 2020), modificações de hardware nos sensores (Wang *et al.*, 2020) ou o uso de algoritmos genéticos para otimização (Costa *et al.*, 2020).

Como desdobramentos científicos e limitações inerentes a este estudo, destacam-se duas frentes para pesquisas futuras. No âmbito ecofisiológico, faz-se necessário modelar o limite termodinâmico exato (Déficit de Pressão de Vapor crítico) a partir do qual os adjuvantes penetrantes perdem sua contribuição na dessecação pré-colheita, permitindo a criação de algoritmos de recomendação baseados no clima. No âmbito do sensoriamento remoto, para viabilizar o uso de sensores RGB de baixo custo em dosséis abertos ou em estádios avançados de desfolha, estudos futuros devem focar no desenvolvimento de algoritmos de segmentação de imagem e aprendizado de máquina. A filtragem do ruído de fundo (solo nu) antes da aplicação da equação de estimativa do NIR pode, teoricamente, resgatar a acurácia quantitativa deste índice sob condições de estresse agudo.

4 CONCLUSÃO

A taxa de aplicação de 100 L ha⁻¹ consolida-se como o ponto de máxima eficácia técnica para a dessecação pré-colheita do feijoeiro. Esta taxa atinge o platô de deposição no dossel,

entregando eficácia biológica equivalente à de 150 L ha^{-1} , porém otimizando o rendimento operacional e mitigando o risco físico de escorrimento da calda.

A hipótese de dissociação de efeitos é confirmada. O adjuvante organosiliconado atua primariamente como um otimizador fisiológico, acelerando a perda de umidade dos grãos e garantindo a uniformidade da secagem, sem depender do aumento da deposição física nas folhas. Contudo, a manifestação deste benefício é termodinamicamente dependente, sendo anulada em ambientes com baixo Déficit de Pressão de Vapor (DPV), onde a baixa demanda evaporativa da atmosfera atua como fator limitante.

A hipótese metodológica de substituição de sensores é refutada para fins quantitativos. Embora o sensor RGB (com NIR estimado) seja eficiente para a detecção binária precoce do estresse químico (24 horas), a degradação progressiva de sua correlação com o sensor multiespectral invalida seu uso para o monitoramento contínuo da dessecação pré-colheita. O colapso celular abrupto e a consequente exposição do solo rompem a premissa matemática da estimativa do NIR, exigindo o uso do sensor multiespectral para avaliações que demandem alta fidelidade agrônômica.

REFERÊNCIAS

- ABRANTES, T. C.; QUEIROZ, A. R. S.; LUCIO, F. R. M. J. A. Assessing the effects of dicamba and 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) on soybean through VIs derived from unmanned aerial vehicle (UAV)-based RGB imagery. **Int J Remote Sens**, [s.l.], v. 42, p. 2740-2758, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1832283>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/348305451_Assessing_the_effects_of_dicamba_and_24_Dichlorophenoxyacetic_acid_24D_on_soybean_through_vegetation_indices_derived_from_Unmanned_Aerial_Vehicle_UAV_based_RGB_imagery. Acesso em: 10 jan. 2023.
- AGISOFT. **Discover intelligent photogrammetry with Metashape**. Process digital images and generate 3D spatial data. Fast and highly accurate, 2022.
- AGUILAR, L.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. de; CARVALHO, O. L. F. de. Decoding Brazil's bean belt: Spatiotemporal patterns, production systems and the pulse of bean production (2011–2022). **Geo: Geography and Environment**, [s.l.], v. 12, n. 2, e70015, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/geo2.70015>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/395100691_Decoding_Brazil's_bean_belt_Spatiotemporal_patterns_production_systems_and_the_pulse_of_bean_production_2011-2022. Acesso em: 10 mar. 2026.
- ANDRADE, A. S. de *et al.* Remote detection of water and nutritional status of soybeans using UAV-based images. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 42, n. 2, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42n2e20210177/2022>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/bG5JmwPB7L83LVLg4Wh6QsS/?lang=en>. Acesso em: 12 dez. 2023.
- ARAI, K. *et al.* Method for NIR reflectance estimation with visible camera data based on regression for NDVI estimation and its application for insect damage detection of rice paddy fields. **International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence (IJARAI)**, [s.l.], v. 5, e. 11, 2016. DOI: <https://doi.org/10.14569/IJARAI.2016.051103>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/405327897_Method_for_NIR_Reflectance_Estimation_with_Visible_Camera_Data_based_on_Regression_for_NDVI_Estimation_and_its_Application_for_Insect_Damage_Detection_of_Rice_Paddy_Fields. Acesso em: 10 jan. 2023.
- AVGOUSTAKI, D. D. *et al.* Autonomous Mobile Robot with Attached Multispectral Camera to Monitor the Development of Crops and Detect Nutrient and Water Deficiencies in Vertical Farms. **Agronomy**, [s.l.], v. 12, n. 11, p. 2691, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12112691>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/11/2691>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- BASÍLIO, S. *et al.* Effect of Adjuvants on Physical–Chemical Properties, Droplet Size, and Drift Reduction Potential. **Agriculture**, [s.l.], v. 14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14122271>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/14/12/2271>. Acesso em: 10 mar. 2025.
- BERGER-NETO, A. *et al.* Effect of spray droplet size, spray volume and fungicide on the control of white mold in soybeans. **Crop Protection**, [s.l.], v. 92, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.10.016>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219416303015>. Acesso em: 18 jun. 2025.

BOLLER, W.; MACHRY, M. Operating pressure and spray nozzles effects on the efficiency of contact herbicide in soybeans. Máquinas e Mecanização Agrícola. **Eng. Agríc.**, [s.l.], v. 27, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000400015>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/VTYZBnWTQBfYZ4nypmGwX9Q/abstract/?lang=pt>. Disponível em: 10 mar. 2023.

BOTELHO, S. de C. C. *et al.* **Épocas de dessecação influenciam na qualidade de grãos e do óleo de soja**. Embrapa Agrossilvipastoril, julho, 2023. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento 9), ISSN: 2675-0813.

COÊLHO, E. dos S. *et al.* Chemical Desiccation in the Preharvest of Cowpea: A Study of How the Time of Application Interferes in the Enzymatic and Physiological Aspects of Seedlings from Desiccated Plants. **ACS Ômega**, [s.l.], v. 9, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c04489>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.4c04489>. Acesso em: 10 jun. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Boletim da safra de grãos: 11º levantamento: safra 2023/2024. Brasília, DF, 2021. **CONAB**. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/11o-levantamento-safra-2023-24/11o-levantamento-safra-2023-24>. Acesso em: 29 nov. 2024.

COSTA, L.; NUNES, L.; AMPATZIDIS, Y. A new visible band index (vNDVI) for estimating NDVI values on RGB images utilizing genetic algorithms. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], v. 172, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105334>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816991932383X>. Acesso em: 10 fev. 2023.

CUNHA, J. P. A. R.; ALVES, G. S.; MARQUES, R. S. Tensão superficial, potencial hidrogeniônico e condutividade elétrica de caldas de produtos fitossanitários e adjuvantes. **Revista Ciência Agronômica**, [s.l.], v. 48, n. 2, p. 261-270, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170030>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/ZCDYrFVwKFtzPwVXFpnhCLb/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

DANCEY, C. P; REIDY, J. Estatística sem matemática: para psicologia usando SPSS para Windows. **Artmed**, Porto Alegre, e. 3, 2006.

DONATO, D. G. *et al.* Evaluation of bean desiccation plants with diquat and glufosinate ammonium using terrestrial hyperspectral sensor. **Australian Journal of Crop Science**, [s.l.], 2022. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.22.16.02.3344>. Disponível em: https://www.cropj.com/donato_16_2_2022_216_226.pdf. Acesso em: 17 nov. 2024.

FAO *et al.* **State of Food Security and Nutrition in the World – SOFI**. Publisher: FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO, 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/publications/fao-flagship-publications/the-state-of-food-security-and-nutrition-in-the-world/en>. Acesso em: 26 jul. 2025.

FAQIR, Y. *et al.* A review on the application of advanced soil and plant sensors in the agriculture sector. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], v. 226, 2024. ISSN 0168-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109385>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169924007762>. Acesso em: 11 abr. 2025.

GALVÍNCIO, J. D.; NAUE, C. R. Estimation of NDVI with visible images (RGB) obtained with drones. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, [s.l.], v. 9, n. 6, p. 407-420, 2020. DOI: 10.29150/jhrs.v9.6.p407-420. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/340822456_Estimation_of_NDVI_with_visible_images_RGB_obtained_with_drones. Acesso em: 8 jan. 2023.

GALVÍNCIO, J. *et al.* ADIVA - Análise de Índice de Vegetação e Água. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s.l.], v. 15, p. 1654-1659, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.3.p1654-1659>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/361468403_ADIVA-ANALISE_DE_INDICE_DE_VEGETACAO_E_AGUA. Acesso em: 11 fev. 2023.

GANASCINI, D. *et al.* Diferenciação espectral de feijão dessecado com diquat e amônio-glufosinato por meio de sensor hiperespectral. In: XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos – SP, 2019. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2019/10.29.15.28/doc/97937.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2023.

GRIESANG, F. *et al.* How do the droplet spectrum uniformity and spray volume of flat-fan nozzles influence fungicide spray distribution quality in soybeans? **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 42, n. 2, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/1809_4430-Eng.Agric.v42n2e20210122/2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/rCKcYG48WbSZD8jKt5VPj3c/?lang=en>. Acesso em: 22 abr. 2025.

HILZ, E.; VERMEER, A. W. P. Spray drift review: the extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction. **Crop Protection**, [s.l.], v. 44, n. 1, p. 75-83, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.10.020>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219412003006>. Acesso em: 15 mai. 2024.

HIRANO, M. *et al.* Validação de escala diagramática para estimativa de desfolha provocada pela ferrugem asiática em soja. **Summa Phytopathologica**, [s.l.], v. 36, n. 3, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-54052010000300012>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sp/a/crkDtzZRx8RBjyxVYPPwSL/>. Acesso em: 10 mar. 2024.

HOTT, M. C. *et al.* Uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para estimativa de vigor e de correlações agronômicas em genótipos de capim Cynodon. In: SILVA, C. E. da P. (org.) **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Atena Editora, Ponta Grossa, p. 235-244, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/334757195_USO_DE_VEICULO_AEREO_NAO_TRIPULADO_VANT_PARA_ESTIMATIVA_DE_VIGOR_E_DE_CORRELACOES_AGRONOMICAS_EM_GENOTIPOS_DE_CAPIM_CYNODON. Acesso em: 10 mar. 2024.

JANOUSSEK, J. *et al.* Predicting the Optimum Corn Harvest Time via the Quantity of Dry Matter Determined with Vegetation Indices Obtained from Multispectral Field Imaging. **Remote Sens.**, [s.l.], v. 15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15123152>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/12/3152>. Acesso em: 10 mar. 2024.

JORGE, J.; VALLBÉ, M.; SOLER, J. A. Detection of irrigation in homogeneities in an olive grove using the NDRE vegetation index obtained from UAV images. **European Journal of Remote Sensing**, [s.l.], v. 52, n. 1, p. 169-177, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1572459>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/22797254.2019.1572459>. Acesso em: 23 mar. 2023.

MARCANDALLI, L. H.; LAZARINI, E.; MALASPINA, I. C. Épocas de aplicação de dessecantes na cultura da soja: qualidade fisiológica de sementes. **Revista Brasileira de Sementes**, [s.l.], v. 33, n. 2, p. 241-250, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-31222011000200006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbs/a/tjSR6CPzhptDZ6MyVQ9L4Pc/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 12 mar. 2024.

MASSRUHÁ, S. M. F. S. *et al.* **A transformação digital no campo rumo à agricultura sustentável e inteligente**. Embrapa Agricultura Digital, [s.l.], 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1126214/a-transformacao-digital-no-campo-rumo-a-agricultura-sustentavel-e-inteligente>. Acesso em: 11 abr. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. AGROFIT - Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários. Brasília, DF, MAPA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/agrotoxicos/agrofit>. Acesso em: 11 abr. 2023.

PRANASWI, D. *et al.* Analyzing the synergistic impact of UAV-based technology and knapsack sprayer on weed management, yield-contributing traits, and yield in wheat (*Triticum aestivum* L.) for enhanced agricultural operations. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], v. 219, p. 108796, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108796>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816992400187X>. Acesso em: 17 fev. 2025.

QGIS Development Team, 2023. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 15 mar. 2024.

RIBEIRO, L. F. O.; VITÓRIA, E. L. da. Impact of Application Rate and Spray Nozzle on Droplet Distribution on Watermelon Crops Using an Unmanned Aerial Vehicle. **Agriculture**, [s.l.], v. 14, n. 8, p. 1351, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14081351>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/14/8/1351>. Acesso em: 14 out. 2025.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 14 dez. 2025.

ROMAN, E. S.; BECKIE, H.; VARGAS, L.; HALL, L.; RIZZARDI, M. A.; WOLF, T. M. **Como funcionam os herbicidas: da biologia à aplicação**. Passo Fundo: Berthier, 2007. 158p.

ROMAN, R. A. Aplicações de defensivos utilizando a técnica do baixo volume. **Revista Cultivar Máquinas**, [s.l.], e147, 2020. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/artigos/aplicacoes-de-defensivos-utilizando-a-tecnica-do-baixo-volume>. Acesso em: 10 jan. 2023.

ROSADO C. B. *et al.* Physiological quality of bean seeds after application of desiccant herbicides. **CROP PRODUCTION, Cienc. Rural**, [s.l.], v. 49, n. 9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180228>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/mVgdDrB7mWM9QnJqMw5JW5F/?lang=en>. Acesso em: 10 jan. 2023.

ROUSE, J. W. *et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **NASA Special Publication**, [s.l.], v. 351, p. 309-317, 1974. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>. Acesso em: 10 mar. 2025.

SILVA, C. L. da *et al.* Interface Properties and Droplet Spectra as a Function of Adjuvants and Spray Nozzles. **AgriEngineering**, [s.l.], v. 7, n. 4, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering7040116>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2624-7402/7/4/116>. Acesso em: 8 set. 2025.

SILVEIRA, F. da; BARBEDO, J. G. A.; SILVA, S. L. C. da. Proposal for a framework to manage the barriers that hinder the development of agriculture 4.0 in the agricultural production chain. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], v. 214, nov. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108281>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169923006695>. Acesso em: 5 ago. 2025.

SIMIONATTO, T. *et al.* Qualidade de sementes de feijão preto submetidas à dessecação pré-colheita por diferentes princípios ativos e tempos de aplicação. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, [s. l.], v. 3, p. 322–327, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2021v25n3p322-327>. Disponível em: <https://ensaioeciencia.pgsscogna.com.br/ensaioeciencia/article/view/8838>. Acesso em: 10 set. 2024.

SOUZA, L. S. B. da *et al.* Análise comparativa entre o NDVI obtido por imagens multiespectrais e visíveis (RGB) em câmera acoplada em drone em área de videira. **Revista de Sensoriamento Remoto Hiperespectral**, [s. l.], v. 13, n. 6, p. 741–751, 2024. DOI: <https://doi.org/10.29150/jhrs.v13.6.p741-751>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/377890472_Analise_comparativa_entre_o_NDVI_obtido_por_imagens_multiespectrais_e_visiveis_RGB_em_camera_acoplada_em_drone_em_a_rea_de_videira. Acesso em: 10 jun. 2024.

SZIGETI, N. *et al.* Limitations and solutions for developing a grain yield and protein content forecasting model based on vegetation indices in organic wheat production – on-farm experimentation. **Biological Agriculture & Horticulture**, [s. l.], v. 40, n. 3, p. 190–204, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/01448765.2024.2364304>. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/381197886_Limitations_and_solutions_for_developing_a_grain_yield_and_protein_content_forecasting_model_based_on_vegetation_indices_in_organic_wheat_production_-_on-farm_experimentation. Acesso em: 10 jun. 2025.

TAIZ, L.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A.; ZEIGER, E. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 7. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. ISBN 978-85-8271-367-9.

TEIXEIRA, A. *et al.* SAFER applications for water productivity assessments with aerial camera onboard a remotely piloted aircraft (RPA). A rainfed corn study in Northeast Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [s.l.], v. 22, p. 100514, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100514>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938521000501>. Acesso em: 10 ago. 2024.

VARGAS, R. L. *et al.* Macronutrients and micronutrients variability in soybean seeds. **Journal of Agricultural Science**, Toronto, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 209–222, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v10n4p209>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/323568955_Macronutrients_and_Micronutrients_Variability_in_Soybean_Seeds. Acesso em: 13 mar. 2024.

WANG, S. *et al.* Evaluation of compact air-induction flat fan nozzles for herbicide applications: Spray drift and biological efficacy. **Front. Plant Sci.**, [s. l.], v. 14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1018626>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/368237829_Evaluationof_compact_air-induction_flat_fan_nozzles_for_herbicide_applications_Spray_drift_and_biological_efficacy. Acesso em: 14 abr. 2024.

WANG, C. *et al.* Comparison between Satellite Derived Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence, NDVI and kNDVI in Detecting Water Stress for Dense Vegetation across Southern China. **Remote Sens.**, [s. l.], v. 16, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16101735>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/380584678_Comparison_between_Satellite_Derived_Solar-Induced_Chlorophyll_Fluorescence_NDVI_and_kNDVI_in_Detecting_Water_Stress_for_Dense_Vegetation_across_Southern_China. Acesso em: 18 mar. 2025.

WANG, L. *et al.* Precise Estimation of NDVI with a Simple NIR Sensitive RGB Camera and Machine Learning Methods for Corn Plants. **Sensors**, [s. l.], v. 20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20113208>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/11/3208>. Acesso em: 10 fev. 2023.

WANG, S. *et al.* Evaluationof compact air-induction flat fan nozzles for herbicide applications: Spray drift and biological efficacy. **Front. Plant Sci.**, [s. l.], v. 14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1018626>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/368237829_Evaluationof_compact_air-induction_flat_fan_nozzles_for_herbicide_applications_Spray_drift_and_biological_efficacy. Acesso em: 10 mar. 2024.

WEI, S.; FANG, H. Estimation of canopy clumping index from MISR and MODIS sensors using the normalized difference hotspot and darkspot (NDHD) method: The influence of

BRDF models and solar zenith angle. **Rem. Sens. Environ.**, [s. l.], 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.039>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/309884824_Estimation_of_canopy_clumping_index_from_MISR_and_MODIS_sensors_using_the_normalized_difference_hotspot_and_darkspot_NDHD_method_The_influence_of_BRDF_models_and_solar_zenith_angle Acesso em: 10 mar. 2023.

XU, G. *et al.* Effects of Different Spray Adjuvants on the Permeation of Dinotefuran in Rice Leaves. **Agronomy**, [s. l.], v. 14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14030516>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/378733074_Effects_of_Different_Spray_Adjuvants_on_the_Permeation_of_Dinotefuran_in_Rice_Leaves Acesso em: 10 jun. 2025.

XUNWEI, W. *et al.* Distribution uniformity improvement methods of a large discharge rate disc spreader for UAV fertilizer application. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], v. 220, p. 108928, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108928>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169924003193>. Acesso em: 29 jun. 2025.

YUAN, Q. *et al.* Deep learning in environmental remote sensing: Achievements and challenges. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 241, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111716>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425720300857> Acesso em: 18 jun. 2024.

ZANATTA, E. *et al.* Pre-harvest Desiccation: Productivity and physical and physiological inferences on soybean seeds during storage. **Journal of Agricultural Science**, Richmond Hill, v. 10, n. 6, p. 354–362, jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v10n6p354>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324980442_Pre-harvest_Desiccation_Productivity_and_Physical_and_Physiological_Inferences_on_Soybean_Seeds_During_Storage. Acesso em: 11 abr. 2025.

CAPÍTULO 4

Propriedades físico-químicas e espectro de gotas do herbicida diquat associado a adjuvantes
em diferentes taxas de aplicação

RESUMO

A otimização da aplicação de herbicidas de contato exige a compreensão da complexa interação entre a composição da calda e o processo de atomização. Diante disso, o presente trabalho objetivou avaliar como diferentes taxas de aplicação (50, 100 e 150 L ha⁻¹) e a adição de três adjuvantes (polidimetilsiloxano, D'limoneno e nonil fenoxi poli (etilenoxi) etano) interagem para modular as propriedades físico-químicas da calda e o espectro de gotas gerado por ponta com indução de ar (AVI 110025 a 414 kPa). Os ensaios foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3x4, com quatro repetições, com as propriedades avaliadas por tensiometria de gota pendente e viscosimetria rotacional, e o espectro mensurado por análise de imagem em tempo real. A adição de adjuvantes foi o fator dominante na alteração das propriedades da calda, reduzindo a tensão superficial de forma mais acentuada que o herbicida isoladamente. O polidimetilsiloxano destacou-se nesta redução e, paradoxalmente à física de pontas convencionais, promoveu o maior aumento no diâmetro mediano volumétrico (DMV), resultando na menor porcentagem de gotas suscetíveis à deriva (%<100 µm). A viscosidade da calda sofreu alterações marginais, com efeito significativo apenas na menor concentração de herbicida (150 L ha⁻¹). Conclui-se que a taxa de aplicação de 100 L ha⁻¹ emerge como um ponto de equilíbrio técnico, maximizando os benefícios dos adjuvantes no aumento do tamanho de gota e garantindo segurança contra deriva, representando o melhor compromisso entre concentração de produto e qualidade da pulverização.

Palavras-chave: atomização; deriva; surfactante; tamanho de gotas; tensão superficial; viscosidade.

ABSTRACT

Optimizing the application of contact herbicides requires understanding the complex interaction between the spray mixture composition and the atomization process. Therefore, this study aimed to evaluate how different application rates (50, 100, and 150 L ha⁻¹) and the addition of three adjuvants (polydimethylsiloxane, D'limonene, and nonylphenoxy poly(ethyleneoxy)ethane) interact to modulate the physicochemical properties of the spray mixture and the droplet spectrum generated by an air-induction nozzle (AVI 110025 at 414 kPa). The tests were conducted in a completely randomized design, in a 3 x 4 factorial scheme, with four replications. The properties were evaluated by pendant droplet tensiometry and rotational viscometry, and the spectrum was measured by real-time image analysis. The addition of adjuvants was the dominant factor in altering the spray mixture properties, reducing surface tension more markedly than the herbicide alone. Polydimethylsiloxane stood out in this reduction and, paradoxically to the physics of conventional nozzles, promoted the greatest increase in volume median diameter (VMD), resulting in the lowest percentage of droplets susceptible to drift (%<100 µm). The viscosity of the spray solution underwent marginal changes, with a significant effect only at the lowest herbicide concentration (150 L ha⁻¹). It is concluded that the application rate of 100 L ha⁻¹ emerges as a technical equilibrium point, maximizing the benefits of adjuvants in increasing droplet size and ensuring safety against drift, representing the best compromise between product concentration and spray quality.

Keywords: atomization; drift; surfactant; droplet size; surface tension; viscosity.

1 INTRODUÇÃO

O sucesso da aplicação de agroquímicos, especialmente de herbicidas de contato, depende da sinergia entre múltiplos fatores operacionais e físico-químicos para garantir uma cobertura uniforme do alvo (Cunha *et al.*, 2010). Neste contexto, variáveis como a tipo de ponta, a vazão, a viscosidade e a tensão superficial da calda, atuam como determinantes no processo de quebra do fluido (Albrecht *et al.*, 2024; Donato *et al.*, 2022). O processo de atomização inicia-se com a formação de uma lâmina líquida que, sob influência da resistência do ar e da tensão superficial, torna-se instável e se rompe em ligamentos e, finalmente, em gotas (Griesang *et al.*, 2022). Compreender essa dinâmica é fundamental para prever o comportamento da pulverização em cenários de alta complexidade técnica.

A uniformização da colheita por meio da dessecação é uma ferramenta estratégica para a mitigação de perdas no período crítico entre a maturidade fisiológica e a operação de colheita (Botelho *et al.*, 2023). A busca por maior rendimento operacional tem impulsionado a adoção de taxas de aplicação reduzidas. Contudo, a viabilidade desta prática é desafiadora quando se utiliza o herbicida diquat. Por ser um inibidor do fotossistema I (PSI) com ação de contato rápida e fulminante, a eficácia do diquat depende intrinsecamente de uma excelente cobertura foliar (Gaultier; Gulden, 2016). Garantir essa cobertura utilizando baixas taxas de aplicação exige o refinamento da tecnologia de aplicação (Cunha *et al.*, 2017; Griesang *et al.*, 2022).

Para contornar este desafio, duas tecnologias são frequentemente combinadas no campo: pontas de jato plano com indução de ar e adjuvantes surfactantes. Por um lado, as pontas com indução de ar (câmara Venturi) são utilizadas para mitigar a deriva, pois a injeção de ar no interior do fluido gera gotas mais grossas e com menor suscetibilidade ao arraste aerodinâmico (Dafsari *et al.*, 2021; Sijs *et al.*, 2023; Doruchowski *et al.*, 2017). Por outro lado, adjuvantes não iônicos são adicionados à calda para reduzir drasticamente a tensão superficial, atuando como espalhantes e umectantes que prolongam o período de absorção cuticular (Cunha *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2025; Zhao *et al.*, 2022).

A associação destas duas ferramentas cria um antagonismo tecnológico fundamental. Na física clássica de atomização (pontas convencionais), a redução da tensão superficial promovida pelo adjuvante diminui a energia necessária para o rompimento do fluido, favorecendo a formação de gotas mais finas. Contudo, em pontas com indução de ar, a dinâmica de fluidos é mais complexa. O estado da arte atual indica que a presença de surfactantes altera a eficácia de injeção e o aprisionamento de bolhas de ar no interior da câmara Venturi (Sijs *et al.*, 2023). Consequentemente, o espectro de gotas torna-se altamente imprevisível, gerando

uma lacuna crítica no conhecimento: não se sabe qual mecanismo físico prevalece, a aeração interna que "infla" a gota ou a quebra facilitada no orifício de saída, quando diferentes concentrações de herbicida e adjuvantes interagem.

A eficácia agronômica final depende tanto da deposição física quanto da absorção fisiológica. Costa *et al.* (2020), apontam que a redução da tensão superficial diminui o ângulo de contato da gota, favorecendo o espalhamento e ampliando a área de cobertura. Este mecanismo compensatório é crucial quando se utilizam gotas grossas, que naturalmente apresentam menor capacidade de cobertura em relação a gotas finas (Albrecht *et al.*, 2024; Donato *et al.*, 2022; Simionatto *et al.*, 2021). Isso levanta a hipótese de que, ao se utilizar pontas com indução de ar, a interação com surfactantes altera o espectro de gotas de maneira contra-intuitiva, e que as modificações nas propriedades físico-químicas da calda governam a segurança contra deriva e a qualidade da deposição.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi investigar os mecanismos físicos desta interação, avaliando o espectro de gotas produzido por pontas de jato plano com indução de ar sob diferentes concentrações do herbicida diquat (taxas de 50, 100 e 150 L ha⁻¹), e adição de adjuvantes, bem como caracterizar as propriedades físico-químicas (tensão superficial e viscosidade) que modulam o processo de atomização.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Delineamento experimental e tratamentos

Os ensaios foram realizados no Centro de Excelência em Mecanização Agrícola (CEMA) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em Monte Carmelo, MG.

As avaliações de espectro de gotas e viscosidade foram conduzidas em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 x 4, com quatro repetições. O primeiro fator foi constituído por três taxas de aplicação (50, 100 e 150 L ha⁻¹) e o segundo fator pela adição de adjuvantes (ausência de adjuvante, polidimetilsiloxano, D'limoneno e nonil fenoxi poli (etilenoxi) etano. Para o ensaio de tensão superficial, adicionou-se um tratamento absoluto ao esquema fatorial (3 x 4 + 1), correspondente à água deionizada pura.

2.2 Composição das caldas

As caldas foram preparadas utilizando o herbicida Diquat (Offer 200 SL, 200 g i.a. L⁻¹, Yonon) fixando-se a dose de campo em 1,5 L ha⁻¹ (300 g ia ha⁻¹). Para simular as taxas de aplicação de 50, 100 e 150 L ha⁻¹, o herbicida foi diluído nas concentrações de 3,0%, 1,5% e 1,0% (v/v), respectivamente.

Os adjuvantes não-iônicos foram adicionados às caldas nas concentrações recomendadas pelos fabricantes: 0,04% v/v para polidimetilsiloxano e 0,05% v/v para D'limoneno e nonil fenoxi poli (etilenoxi) etano (Tabela 1).

Tabela 1 – Especificações técnicas, funções e concentrações dos adjuvantes utilizados no preparo das caldas.

Nome comercial	Composição	Função	Dose (mL 100 L)
Disperse Ultra ¹	polidimetilsiloxano	espalhante, adesivo, reductor de deriva, reductor de espuma, surfactante, penetrante e umectante	40

Satus Ultra ²	D'limoneno	antiespumante, estabilizante e umectante	50
Agral ³	nonil fenoxi poli (etilenoxi) etano	espalhante adesivo	50

¹Disperse Ultra – Ubyfol, ²Satus Ultra – Ubyfol e ³Agral – Syngenta.

Fonte: A autora.

2.3 Avaliações

2.3.1 Tensão superficial e viscosidade da calda

A tensão superficial estática foi mensurada pelo método da gota pendente com o ajuste da equação de Young-Laplace, utilizando um tensiômetro óptico (DSA30, KRUSS, Hamburgo, Alemanha). A tensão foi calculada a partir da média de 60 leituras obtidas ao longo de 60 segundos, com captura de 50 quadros por segundo (FPS) e zoom de 2,5x. As gotas foram geradas na extremidade de uma agulha de aço inox de 1,8 mm de diâmetro. Devido à acentuada redução da tensão superficial provocada pelos adjuvantes polidimetilsiloxano e D'limoneno, o volume da gota foi ajustado para 2,3 µL para estas caldas, enquanto para as demais caldas e para a água deionizada utilizou-se um volume de 3,8 µL. O ambiente foi mantido a $26,2 \pm 1$ °C e 72% de umidade relativa do ar.

A viscosidade dinâmica das caldas foi determinada utilizando um viscosímetro rotacional digital (LVDV2T, Brookfield, Middleboro, Massachusetts, EUA), equipado com adaptador para amostras de baixa viscosidade (ULA - Ultra Low Adapter). Considerando o comportamento newtoniano das soluções avaliadas (base aquosa sem polímeros espessantes), a leitura foi realizada sob taxa de cisalhamento constante, com velocidade de rotação do *spindle* fixada em 80 rpm. As amostras (16 mL) foram mantidas a 25 ± 1 °C com auxílio de um banho ultratermostático (QUIMIS, Diadema, São Paulo, Brasil).

2.3.2 Avaliação do espectro de gotas

O espectro foi mensurado por análise de imagens de partículas em alta velocidade (PDIA - Particle Droplet Image Analysis), utilizando um analisador óptico (VisiSize Portable P15,

Oxford Lasers, Reino Unido). Foram extraídos os diâmetros de gota que delimitam 10%, 50% e 90% do volume acumulado pulverizado ($D_{v0,1}$, $D_{v0,5}$ ou DMV, e $D_{v0,9}$, respectivamente), bem como a percentagem do volume contido em gotas menores que 100 μm ($v100 \mu\text{m}$), utilizada como indicador do risco de deriva. A uniformidade do espectro foi avaliada pela Amplitude Relativa (AR), (Cunha, Bueno e Ferreira, 2010), (Equação 1).

$$AR = \frac{D_{v0,9} - D_{v0,1}}{D_{v0,5}} \quad (1)$$

Onde:

AR: amplitude relativa;

$D_{v0,1}$: diâmetro de gota tal que 10% do volume total pulverizado é composto por gotas de menor diâmetro;

$D_{v0,5}$: diâmetro de gota tal que 50% do volume total pulverizado é composto por gotas de menor diâmetro, também conhecido como diâmetro da mediana volumétrica (DMV);

$D_{v0,9}$: diâmetro de gota tal que 90% do volume total pulverizado é composto por gotas de menor diâmetro.

A atomização ocorreu no interior de uma câmara de pulverização (TE900, Tecnal, Piracicaba, São Paulo, Brasil), isolando o feixe óptico de correntes de ar externas. As condições termohigrométricas foram mantidas entre 26,3 e 28,2 °C e umidade relativa do ar de aproximadamente 75%.

As gotas foram geradas por uma ponta de jato plano com indução de ar (AVI 110025, Jacto, Pompéia, São Paulo, Brasil), operando à pressão constante de 414 kPa (60 PSI), resultando em uma vazão de 1,15 L min⁻¹. Para compor as quatro repetições e isolar a variabilidade de fabricação, utilizaram-se quatro pontas físicas distintas do mesmo modelo. A medição foi realizada em modo estático, com a ponta posicionada a 35 cm de altura em relação ao feixe de laser e angulada a 45°, garantindo a leitura do eixo menor do jato e avaliando a atomização primária sem a interferência do arraste aerodinâmico.

2.4 Análises Estatísticas

A análise dos dados foi conduzida no ambiente R, versão 4.3.1 (R Core Team, 2023), utilizando o ecossistema *tidyverse* para manipulação e *ggplot2* para visualização. A

normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias foram verificadas, respectivamente, pelos testes de Shapiro-Wilk e Levene. Atendidas as pressuposições paramétricas, os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA). As médias dos tratamentos do esquema fatorial foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Para a tensão superficial, a comparação do tratamento adicional (testemunha absoluta - água deionizada) com o fatorial foi realizada por análise de contraste ($p \leq 0,05$). Adicionalmente, aplicou-se o teste de Dunnett ($p \leq 0,05$) para comparar os tratamentos fatoriais à testemunha absoluta.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Tensão superficial e viscosidade da calda

A análise da tensão superficial revelou interação significativa entre as taxas de aplicação e os adjuvantes. A calda contendo apenas o herbicida diquat apresentou redução da tensão superficial em relação à água deionizada, evidenciando a ação dos tensoativos presentes na formulação original do produto. Um comportamento físico notável, inerente à formulação, foi o efeito dose-resposta na ausência de adjuvantes: o incremento da taxa de aplicação de 50 para 150 L ha⁻¹ (que reduz a concentração do herbicida na calda de 3,0% para 1,0% v/v) resultou em um leve aumento da tensão superficial (de 32,46 para 32,76 mN m⁻¹), comprovando a diluição dos tensoativos originais do produto. Contudo, a adição dos adjuvantes sobrepôs esse efeito, promovendo reduções drásticas. O organosiliconado polidimetilsiloxano apresentou o desempenho mais extremo, atingindo a menor tensão superficial do ensaio na 150 L ha⁻¹ (Tabela 2).

Tabela 2 - Tensão superficial das caldas herbicidas sob diferentes taxas de aplicação e adjuvantes. Monte Carmelo - Minas Gerais.

Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	Tensão superficial (mN m ⁻¹)*			
	Adjuvantes			
	-	I	II	III
50	32,46 [□] d	12,44 [□] B a	20,88 [□] c	15,33 [□] b
100	32,62 [□] d	12,68 [□] C a	20,89 [□] c	15,46 [□] b
150	32,76 [□] d	11,81 [□] A a	20,89 [□] c	15,54 [□] b
Água		74,71 B		
Média do fatorial		20,32 A		
CV(%)		0,254		
SW		0,06		

L

0,03

Médias seguidas por letras distintas, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$); * Diferença significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$); SW e L representam os valores p para os testes de Shapiro-Wilk (normalidade dos resíduos) e Levene (homogeneidade de variâncias), respectivamente (valores de $p > 0,05$ indicam atendimento aos pressupostos da ANOVA); I: polidimetilsiloxano; II: D'limoneno e III: nonil fenoxi poli (etilenoxi) etano.

Fonte: A autora.

A análise mostrou superioridade do organosiliconado na redução da tensão superficial, em comparação ao D-limoneno e ao nonil fenoxi poli(etilenoxi)etano. A estrutura molecular destes compostos, caracterizada pela alta flexibilidade da cadeia siloxânica e baixa energia superficial intrínseca, permite uma orientação altamente eficiente na interface líquido-ar (Qiu *et al.*, 2025; Li *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2023). Do ponto de vista agrônomo, essa redução favorece a molhabilidade, a retenção e o espalhamento da gota sobre alvos foliares (Cunha *et al.*, 2017; Costa *et al.*, 2020). Na física clássica de atomização, fluidos com menor tensão superficial oferecem menor resistência às forças aerodinâmicas, o que teoricamente antecipa o rompimento do líquido e gera gotas mais finas (Griesang *et al.*, 2022).

Em relação à viscosidade dinâmica, observou-se interação significativa entre os fatores avaliados. A adição de adjuvantes elevou marginalmente os valores nas caldas preparadas para a taxa de 150 L ha⁻¹. Contudo, os resultados absolutos de todo o ensaio oscilaram em uma faixa extremamente estreita, variando apenas entre 1,00 e 1,05 cP (Tabela 3).

Tabela 3 - Viscosidade dinâmica das caldas herbicidas sob diferentes taxas de aplicação e adjuvantes. Monte Carmelo - Minas Gerais.

Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	Viscosidade (cP)*				
	Adjuvantes				Média
	-	I	II	III	
50	1,03 A	1,05 A	1,04	1,04	1,04
100	1,04 A	1,03 B	1,04	1,03	1,04
150	1,01 Bb	1,04 ABa	1,04 a	1,03 a	1,03
Média	1,03	1,04	1,04	1,03	
CV(%)			0,83		
SW			0,01		
L			0,02		

Médias seguidas por letras distintas, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$); * Diferença significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$); SW e L representam os valores p para os testes de Shapiro-Wilk (normalidade dos resíduos) e Levene (homogeneidade de variâncias), respectivamente; I: polidimetilsiloxano; II: D'limoneno e III: nonil fenoxi poli (etilenoxi) etano.

Fonte: A autora.

Embora o equipamento tenha detectado diferenças significativas, impulsionadas pelo baixíssimo coeficiente de variação, a magnitude absoluta variou apenas centésimos de cP. Considerando que a viscosidade da água pura a 20 °C é de aproximadamente 1,00 cP, todas as caldas avaliadas mantiveram um comportamento estritamente aquoso. Embora fluidos altamente viscosos resistam à fragmentação e gerem gotas maiores (Donato *et al.*, 2022), a variação centesimal observada neste estudo não possui magnitude física suficiente para alterar o padrão de escoamento ou o processo de atomização primária.

A integração das análises físico-químicas indica que a reologia (viscosidade) permaneceu inalterada em termos práticos. Portanto, as alterações subsequentes no espectro de gotas serão governadas primariamente pela redução da tensão superficial interagindo com a dinâmica aerodinâmica da ponta com indução de ar.

3.2 Espectro de gotas

As diferentes composições de calda alteraram significativamente a atomização primária (Tabela 4). Houve interação entre a taxa de aplicação e os adjuvantes para o diâmetro de gotas muito finas $Dv_{0,1}$ e para o percentual de gotas suscetíveis à deriva ($\% < 100 \mu\text{m}$). Para o diâmetro mediano volumétrico ($Dv_{0,5}$), diâmetro de gotas grossas ($Dv_{0,9}$) e amplitude relativa (AR), os fatores atuaram de forma independente. De modo geral, a ponta com indução de ar gerou um espectro classificado entre Muito Grosso e Extremamente Grosso, segundo a norma ASABE S572.3 (ASABE, 2020).

A adição de adjuvantes, especialmente o polidimetilsiloxano e o D-limoneno, promoveu um aumento expressivo no tamanho das gotas ($Dv_{0,5}$) e melhorou a uniformidade do espectro (redução da AR). O impacto mais drástico ocorreu no potencial de deriva (v_{100}): enquanto a calda apenas com herbicida apresentou até 13,01% do volume em gotas menores que 100 μm (na taxa de 50 L ha⁻¹), a adição do organosiliconado reduziu esse valor para uma média de 3,70% (uma mitigação de quase 72% no risco físico de deriva). Em relação às taxas de aplicação, na ausência de adjuvantes, o incremento da taxa de aplicação de 50 para 150 L ha⁻¹ resultou em gotas maiores e menor risco de deriva.

Tabela 4 - Parâmetros do espectro de gotas gerados por ponta com indução de ar sob diferentes taxas de aplicação e adjuvantes. Monte Carmelo - Minas Gerais.

Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	Dv _{0,1} (µm)*					Dv _{0,5} (µm)*				
	Adjuvantes					Adjuvantes				
	-	I	II	III	Média	-	I	II	III	Média
50	110,60 Bb	205,93 a	202,35 a	160,95 c	169,96	382,50	459,68	452,58	426,23	430,74 B
100	124,68 Ac	208,90 a	204,47 a	158,85 b	174,97	406,08	466,40	456,73	431,00	438,64 AB
150	132,76 Ad	214,76 a	202,05 b	159,98 c	169,26	406,03	470,65	455,00	441,38	443,27 A
Média	122,68	210,86	202,95	159,93		398,20 c	463,70 a	455,43 a	432,87 b	
CV(%)	3,09					2,85				
SW	0,55					0,31				
L	0,01					0,22				
Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	Dv _{0,9} (µm)*					V100 (% < 100 µm) *				
	Adjuvantes					Adjuvantes				
	-	I	II	III	Média	-	I	II	III	Média
50	723,68	709,15	726,33	700,18	714,83	13,01 Bc	3,70 a	3,77 a	6,53 b	6,70
100	750,30	728,00	710,8	708,65	722,47	11,32 Ac	3,31 a	3,37 a	6,51 b	5,81
150	752,98	730,15	723,9	712,73	729,94	10,51 Ac	3,12 a	3,45 a	6,42 b	5,88
Média	742,32 a	719,82 ab	720,34 ab	707,18 b		11,39	3,20	3,51	6,41	
CV(%)	3,35					4,07				
SW	0,28					0,07				
L	0,24					0,11				

Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)	AR*				
	Adjuvantes				Média
	-	I	II	III	
50	1,60	1,10	1,15	1,55	1,28
100	1,54	1,11	1,11	1,28	1,26
150	1,55	1,11	1,15	1,26	1,27
Média	1,56 c	1,10 a	1,14 a	1,26 b	
CV(%)	3,13				
SW	0,91				
L	0,06				

Médias seguidas por letras distintas, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$); * Diferença significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$); SW e L representam os valores p para os testes de Shapiro-Wilk (normalidade dos resíduos) e Levene (homogeneidade de variâncias), respectivamente (valores de $p > 0,05$ indicam atendimento aos pressupostos da ANOVA); I: polidimetilsiloxano; II: D'limoneno e III: nonil fenoxi poli (etilenoxi) etano.

Fonte: A autora.

Os resultados do espectro de gotas revelam um comportamento físico paradoxal quando analisados em conjunto com as propriedades físico-químicas. A adição dos adjuvantes reduziu drasticamente a tensão superficial da calda. Na física clássica de atomização (pontas convencionais), essa redução diminuiria a energia necessária para o rompimento do fluido, resultando em gotas mais finas. Contudo, observou-se exatamente o oposto: o aumento do $Dv_{0,5}$ e a redução do v_{100} .

Este fenômeno contra-intuitivo é explicado pela dinâmica interna das pontas com indução de ar. Segundo Miller e Butler-Ellis (2000) e corroborado por estudos recentes de dinâmica de fluidos (Sijs *et al.*, 2023), a presença de surfactantes reduz a barreira de energia na interface líquido-ar dentro da câmara Venturi. Isso facilita o aprisionamento e a estabilização de microbolhas de ar no interior do fluido antes de sua ejeção pelo orifício final. Consequentemente, as gotas saem "infladas" (aeradas), resultando em um diâmetro volumétrico maior (Cunha *et al.*, 2010; Ávila *et al.*, 2024). A magnitude deste efeito variou conforme a formulação, justificando a superioridade do organosiliconado em maximizar o tamanho da gota devido à sua capacidade tensoativa.

Uma análise aprofundada do espectro revela um mecanismo físico ainda mais complexo e benéfico: o efeito de compressão da amplitude de gotas. Enquanto os adjuvantes aumentaram significativamente os diâmetros das gotas finas ($Dv_{0,1}$) e médias ($Dv_{0,5}$), eles atuaram de forma inversa sobre as gotas extremamente grossas, reduzindo o $Dv_{0,9}$ (de 742,32 μm na calda sem adjuvante para até 707,18 μm com a adição de nonil fenoxi poli(etilenoxi)etano). Isso demonstra que os surfactantes não apenas "engrossaram" a pulverização, mas estreitaram o espectro em ambas as extremidades. É este mecanismo de corte de extremos que explica a melhoria na uniformidade da aplicação.

Uma análise minuciosa das interações revela comportamentos reológicos específicos de alta relevância prática. Na ausência de adjuvantes, a calda atingiu um platô físico de atomização na taxa de 100 L ha^{-1} . O incremento da taxa para 150 L ha^{-1} não promoveu nenhuma alteração no diâmetro mediano (estagnado em $\sim 406 \mu\text{m}$) ou no risco de deriva ($\sim 10,3\%$), provando que a diluição não traz benefícios à segurança da aplicação. Em contrapartida, o polidimetilsiloxano demonstrou uma capacidade de 'tamponar' o espectro. Sua atividade tensoativa dominou a dinâmica do fluido a ponto de tornar o espectro de gotas praticamente imune às variações da taxa de aplicação, mantendo o risco de deriva na faixa de 3,1% e a amplitude relativa em 1,10 em todas as taxas testadas. Por fim, o nonil fenoxi poli(etilenoxi)etano apresentou um comportamento intermediário, reduzindo a deriva pela metade em relação à testemunha, mas

sem atingir a excelência do adjuvante siliconado ou à base de limoneno, refletindo uma limitação de sua estrutura química anfipática.

Do ponto de vista agrônomo, este comportamento impõe um *trade-off* crítico para a aplicação do diquat. Por ser um herbicida de contato, o diquat exige excelente cobertura foliar, o que teoricamente demandaria gotas mais finas (Godinho Júnior *et al.*, 2020). No entanto, gotas finas são altamente suscetíveis à deriva e à evaporação rápida. O uso da ponta com indução de ar associada ao organosiliconado resolveu o problema da deriva (v100 de apenas 3,20%), mas gerou gotas extremamente grossas, que podem escorrer ou deixar falhas de cobertura (Butts *et al.*, 2024).

Neste cenário, a taxa de aplicação atua como o fiel da balança. A taxa de 50 L ha⁻¹ apresentou o maior risco de deriva na ausência de adjuvantes e oferece baixo volume de veículo para compensar o tamanho das gotas. Por outro lado, a taxa de 100 L ha⁻¹ associada aos adjuvantes entregou um espectro de gotas estatisticamente semelhante ao da taxa de 150 L ha⁻¹ (Dv0,5 e v100), garantindo a mesma segurança física contra deriva, mas com um ganho de 50% no rendimento operacional da máquina no campo.

4 CONCLUSÃO

A redução da tensão superficial da calda, liderada pelo polidimetilsiloxano, não resulta em gotas mais finas. Pelo contrário, facilita a aeração interna na câmara Venturi, promovendo o aumento do diâmetro mediano volumétrico.

Os adjuvantes atuam comprimindo os extremos do espectro de gotas. Eles reduzem simultaneamente a fração suscetível à deriva (Dv0,1) e o volume de gotas grandes (Dv0,9), o que otimiza a uniformidade da pulverização.

A taxa de aplicação de 100 L ha⁻¹ associada ao organosiliconado, consolida-se como o ponto de equilíbrio técnico ideal para a aplicação de diquat. Esta combinação garante máxima segurança contra deriva e cobertura, entregando um ganho de 50% no rendimento operacional em relação a maior taxa de aplicação testada.

Embora a adição de adjuvantes tenha promovido alterações estatísticas na viscosidade dinâmica, a magnitude absoluta destas variações (1,00 a 1,05 cP) manteve as caldas com comportamento estritamente aquoso. Portanto, a viscosidade não atuou como fator determinante nas alterações do espectro de gotas.

REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, L. P. *et al.* Alternative herbicides to paraquat in pre-harvest desiccation of soybean plants. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 23, n. 2, p. 196–202, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5965/223811712322024196>. Disponível em: <https://periodicos.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/24730>. Acesso em: 10 jan. 2025.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **ASABE S572.3: spray Nozzle Classification by Droplet Spectra**. St. Joseph: ASABE, 2020.
- ÁVILA NETO, R. *et al.* Mixtures of 2,4-D and Dicamba with other pesticides and their influence on application parameters. **Int J Pest Manag.**, [s.l.], v. 70, e1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/09670874.2021.1959082>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aws/a/yXV98RWvzSnts46Qs84jpqJ/>. Acesso em: 13 abr. 2025.
- BOTELHO, S. de C. C. *et al.* **Épocas de dessecação influenciam na qualidade de grãos e do óleo de soja**. Embrapa Agrossilvipastoril, julho, 2023. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento 9), ISSN: 2675-0813.
- BUTTS, T. R.; VIRK, S. S.; KOUAME, K. B. J. Droplet size, velocity, and spray coverage from a magnetic-assisted sprayer. **Biosyst Eng.**, [s.l.], v. 245, p. 1-11, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.06.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511024001442>. Acesso em: 17 abr. 2025.
- COSTA, L. L. *et al.* Compatibilidade físico-química de diferentes doses e misturas de herbicidas. **Revista Brasileira de Herbicidas**, [s.l.], v. 19, e3, 2020. DOI: <https://doi.org/10.7824/rbh.v19i3.713>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/347818386_COMPATIBILIDADE_FISICO-QUIMICA_DE_DIFERENTES_DOSES_E_MISTURAS_DE_HERBICIDAS. Acesso em: 13 abr. 2025.
- CUNHA, J. P. A. R.; ALVES, G. S.; MARQUES, R. S. Tensão superficial, potencial hidrogeniônico e condutividade elétrica de caldas de produtos fitossanitários e adjuvantes. **Revista Ciência Agronômica**, [s.l.], v. 48, n. 2, p. 261-270, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170030>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/ZCDYrFVwKFtzPwVXFpnhCLb/>. Acesso em: 17 nov. 2024.
- CUNHA, J. P. A. R.; BUENO, M. R.; FERREIRA, M. C. Espectro de gotas de pontas de pulverização com adjuvantes de uso agrícola. **Planta Daninha**, [s.l.], v. 28, p. 1153-1158, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-83582010000500023>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/bwpVFzKPQ33FYdp3VyMPBvp/>. Acesso em: 17 nov. 2024.
- DAFSARI, R. A. *et al.* Effect of geometrical parameters of air induction nozzles on droplet characteristics and behaviour. **Biosystems Engineering**, [s.l.], v. 209, p. 14-29, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.06.013>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511021001379>. Acesso em: 19 ago. 2025.

DONATO, D. G. *et al.* Evaluation of bean desiccation plants with diquat and glufosinate ammonium using terrestrial hyperspectral sensor. **Australian Journal of Crop Science**, [s.l.], v. 16, e2, p. 216, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.22.16.02.3344>. Disponível em: https://www.cropj.com/donato_16_2_2022_216_226.pdf. Acesso em: 21 nov. 2024.

DORUCHOWSKI, G. *et al.* Low-drift nozzles vs. standard nozzles for pesticide application in the biological efficacy trials of pesticides in apple pest and disease control. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 575, p. 1239-1246, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.200>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716321301>. Acesso em: 23 nov. 2024.

GAULTIER, D.; GULDEN, R. The science and art of dry bean desiccation. **Crops and Soils**, [s.l.], v. 49, e4, p. 12-15, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2134/cs2016-49-0403>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316175271_The_science_and_art_of_dry_bean_desiccation. Acesso em: 23 set. 2023.

GODINHO JÚNIOR, J. D. *et al.* Spray nozzles, working pressures, and use of adjuvant in reduction of 2,4-D herbicide spray drift. **Planta Daninha**, [s.l.], v. 38, p. 1-7, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-835820203801000704683>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/HF335gtdeZJb9v8bRnJxz5K/>. Acesso em: 23 set. 2025.

GRIESANG, F. *et al.* How do the droplet spectrum uniformity and spray volume of flat-fan nozzles influence fungicide spray distribution quality in soybeans? **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 42, n. 2, p. 20210122, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/1809_4430-Eng.Agric.v42n2e20210122/2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/rCKcYG48WbSZD8jKt5VPj3c/?lang=en>. Acesso em: 22 abr. 2025.

LI, X. *et al.* Preparation and Properties Improvement of Decynediol-Ethoxylate-Modified Trisiloxane Surfactant. **Langmuir**, [s.l.], v. 40, e 4, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c02770>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/384638241_Preparation_and_Properties_Improvement_of_Decynediol-Ethoxylate-Modified_Trisiloxane_Surfactant. Acesso em: 17 abr. 2025.

MILLER, P. C. H.; Butler-ELLIS, M. C. Effects of formulation on spray nozzle performance for applications from ground-based boom sprayers. **Crop Protec.**, [s.l.], v. 19, n. 8, p. 609-615, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00080-6](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00080-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219400000806>. Acesso em: 23 nov. 2024.

QIU, J. *et al.* Wetting properties of coal dust with organosilica-hydrocarbon surfactants. **Journal of Dispersion Science and Technology**, [s.l.], v. 46, n. 6, p. 997-1013, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/01932691.2025.2477307>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/389873082_Wetting_properties_of_coal_dust_with_organosilica-hydrocarbon_surfactants. Acesso em: 23 jan. 2026.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 14 dez. 2025.

SILVA, C. L. da *et al.* Interface Properties and Droplet Spectra as a Function of Adjuvants and Spray Nozzles. **AgriEngineering**, [s.l.], v. 7, e4, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering7040116>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2624-7402/7/4/116>. Acesso em: 17 nov. 2025.

SIJS, R.; KOOLJ, S; BONN, D. Droplet size from Venturi air induction spray nozzles. **Experiments in Fluids**, [s.l.], v. 64, n. 2, p. 1-9, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-02303582-2>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/362758990_Droplet_size_from_Venturi_air_induction_spray_nozzles. Acesso em: 23 nov. 2024.

SIMIONATTO, T. *et al.* Qualidade de sementes de feijão preto submetidas à dessecação pré-colheita por diferentes princípios ativos e tempos de aplicação. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, [s.l.], v. 3, p. 322–327, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2021v25n3p322-327>. Disponível em: <https://ensaioeciencia.pgsscogna.com.br/ensaioeciencia/article/view/8838>. Acesso em: 23 nov. 2024.

WANG, K. *et al.* Study on wetting mechanism of nonionic silicone surfactant on coal dust. **Heliyon**, [s.l.], v. 9, n. 6, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16184>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023033911>. Acesso em: 19 abr. 2024.

ZHAO, R. *et al.* Regulating Droplet Impact and Wetting Behaviors on Hydrophobic Leaves using a Nonionic Surfactant. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s.l.], set. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.08.179>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979722015600>. Acesso em: 17 abr. 2025.